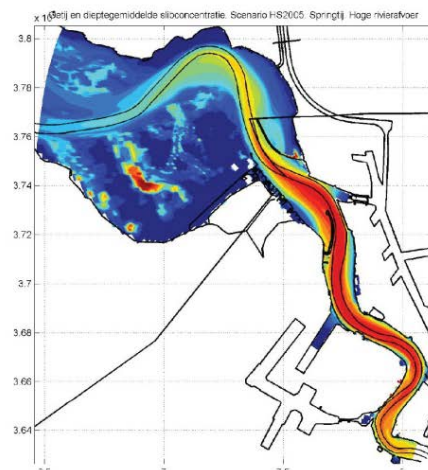


## Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie



## LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij

Basisrapport grootschalige ontwikkeling G-8

01 oktober 2013

---

## Colofon

---

### **International Marine & Dredging Consultants**

Adres: Coveliersstraat 15, 2600 Antwerpen, België

☎: + 32 3 270 92 95

📠: + 32 3 235 67 11

Email: [info@imdc.be](mailto:info@imdc.be)

Website: [www.imdc.be](http://www.imdc.be)

### **Deltares**

Adres: Rotterdamseweg 185, 2600 MH Delft, Nederland

☎: + 31 (0)88 335 8273

📠: +31 (0)88 335 8582

Email: [info@deltares.nl](mailto:info@deltares.nl)

Website: [www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)

### **Svašek Hydraulics BV**

Adres: Schiehaven 13G, 3024 EC Rotterdam, Nederland

☎: +31 10 467 13 61

📠: +31 10 467 45 59

Email: [info@svasek.com](mailto:info@svasek.com)

Website: [www.svasek.com](http://www.svasek.com)

### **ARCADIS Nederland BV**

Adres: Nieuwe Stationsstraat 10, 6811 KS Arnhem, Nederland

☎: +31 (0)26 377 89 11

📠: +31 (0)26 377 85 60

Email: [info@arcadis.nl](mailto:info@arcadis.nl)

Website: [www.arcadis.nl](http://www.arcadis.nl)

---

## Document Identificatie

---

Titel	Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij
Project	Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie
Opdrachtgever	Afdeling Maritieme Toegang - Tavernierkaai 3 - 2000 Antwerpen
Bestek nummer	16EF/2010/14
Documentref	I/RA/11387/12.300/GVH
Documentnaam	K:\PROJECTS\11\11387 - Instandhouding Vaarpassen Schelde\10-Rap\Op te leveren rapporten\Oplevering 2013.10.01\G-8 - Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij_v2.0.docx

---

## Revisies / Goedkeuring

---

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	28/11/2012	Finaal	K. Kuyper		
1.1	31/03/2013	Klaar voor revisie	K. Kuyper		
2.0	01/10/2013	Finaal	K. Kuyper		

---

## Verdeellijst

---

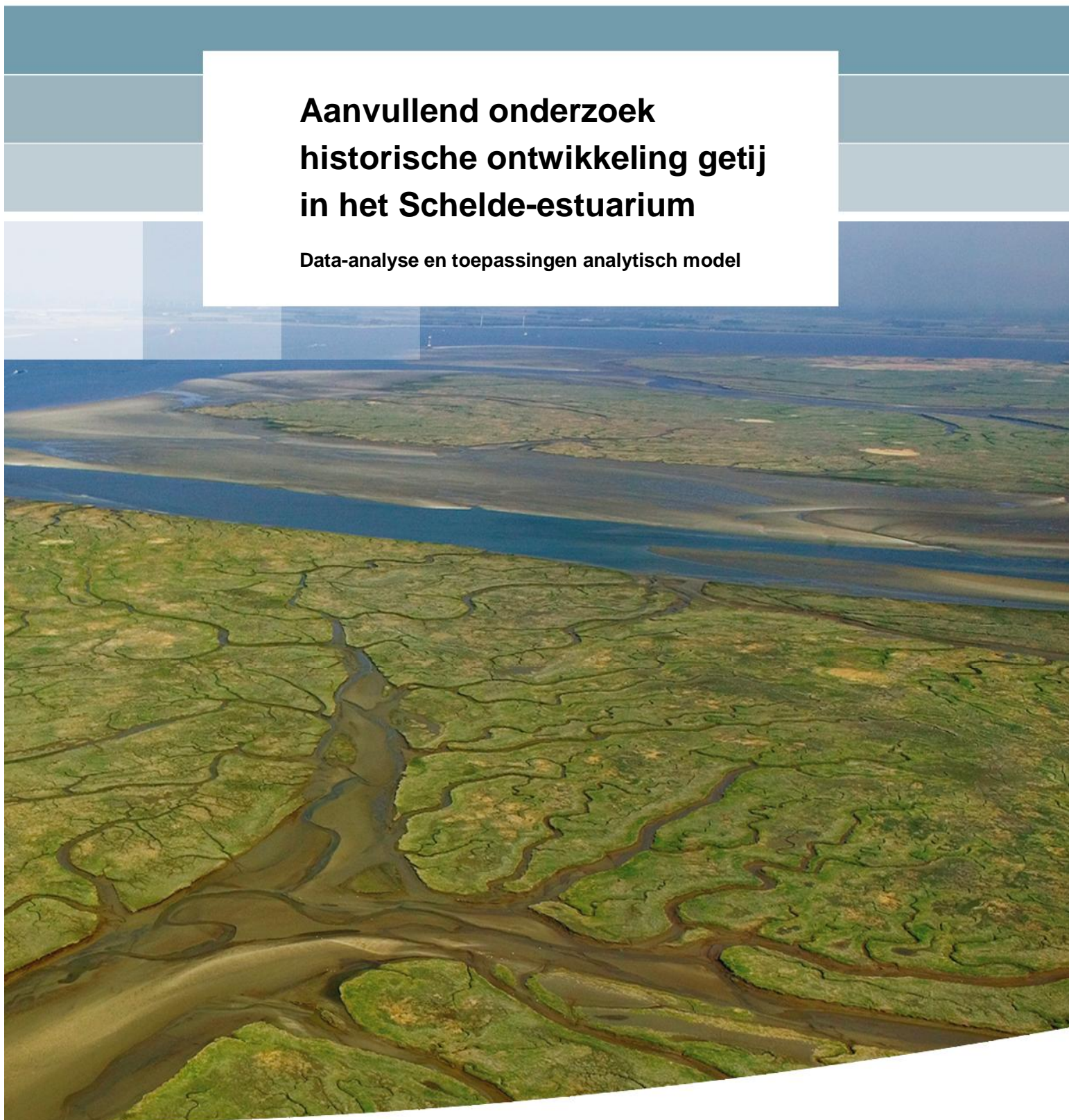
1	Analoog	Youri Meersschaut
1	Digitaal	Youri Meersschaut





# **Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij in het Schelde-estuarium**

**Data-analyse en toepassingen analytisch model**





# **Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij in het Schelde- estuarium**

**Data-analyse en toepassingen analytisch model**

Kees Kuijper

1207720-000





**Titel**

Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij in het Schelde-estuarium

**Opdrachtgever**

Ministerie van Infrastructuur  
en Milieu

**Project**

1207720-000

**Kenmerk**

1207720-000-ZKS-0005

**Pagina's**

109




**Trefwoorden**

Getijslag, Schelde-estuarium, convergentie, bathymetrie, historische ontwikkeling, effecten van ingrepen, data analyse, analytisch model

**Samenvatting**

Aanvullend op het data-analyserapport LTV V&T G-5 (2013) is in dit rapport de evolutie van de getijslag in het Schelde-estuarium verder geanalyseerd door gebruik te maken van aanvullende gegevens van 2009 en 2010. Bij de analyse is gebruik gemaakt van een analytisch model voor het getij in een convergerend estuarium. De getijslag langs het estuarium toont een trendmatige toename in de tijd, welke benaderd kan worden door een lineair deel en een periodiek deel (18,6-jaar periode). Na verwijdering van het periodieke deel blijkt dat ook gedurende het laatste decennium sprake is geweest van een toename van de getijslag. Voor een klein deel (~10%) is de toename sinds 1901 het gevolg geweest van veranderingen op de Noordzee. De grootste veranderingen in de versterking van de getijslag t.o.v. Vlissingen zijn het gevolg van wijzigingen in het estuarium zelf. Veranderingen in geulvolume en mogelijk ook waterberging zijn hierbij de bepalende factoren geweest. Volgens het analytische model zal bij verdere verdieping van de geul een maximale amplificatie en dus ook getijslag worden bereikt. Bij het beheer kan door het storten van aanleg- en onderhoudsbaggerspecie en zandwinning in specifieke locaties de getijslag worden beïnvloed.

**Referenties**

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
3.0	Maart 2013	Ir. C. Kuijper		Prof. Z.B. Wang		Ir. T. Schilperoort	
3.1	Maart 2013	Ir. C. Kuijper		Ir. M. Taal		Ir. T. Schilperoort	
3.2	Aug. 2013	Ir. C. Kuijper		Ir. M. Taal		Drs. F. Hoozemans	

**Status**

definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Achtergronden</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Historische ontwikkeling van de getijslag t/m 2010 langs het Schelde-estuarium</b>	<b>3</b>
2.1	Overwegingen	3
2.1.1	Middeling over 10 en 19 jaar	3
2.1.2	Amplificatie van de getijslag	6
2.2	Beschikbare data	7
2.3	10- en 19-jaargemiddelde getijkarakteristieken	8
2.3.1	Middeling over 10 jaar	8
2.3.2	Middeling over 19 jaar	13
2.4	Analyse na verwijdering 18,6-variatie	17
2.5	Trends en 18,6 jaar variatie in de evolutie van de getijslag	25
2.6	Samenvatting	36
2.7	Conclusies	38
<b>3</b>	<b>Toepassing analytisch model op de Beneden-Zeeschelde</b>	<b>39</b>
3.1	Inleiding	39
3.2	Westerschelde: eerder verkregen resultaten	40
3.3	Beneden-Zeeschelde	47
3.3.1	Bath-Liefkenshoek	50
3.3.2	Liefkenshoek-Antwerpen	53
3.3.3	Antwerpen-Schelle	55
3.4	Vlissingen-Antwerpen	58
3.5	Hansweert-Schelle	62
3.6	Conclusies	67
<b>4</b>	<b>Toepassing analytisch model voor ingrepen</b>	<b>71</b>
4.1	Bodemveranderingen in macrocel 4 (Gat van Ossensisse en Middelgat)	71
4.1.1	Schematisatie	71
4.1.2	Resultaten	74
4.1.3	Conclusies	78
4.2	Zandwinning	79
4.2.1	Schematisatie	79
4.2.2	Resultaten	81
4.2.3	Conclusies	87
4.3	Verlaging Land van Saeftinge	87
4.3.1	Schematisatie	87
4.3.2	Resultaten	89
4.3.3	Conclusies	90
<b>5</b>	<b>Toepassing van het analytische model voor bepaling getijasymmetrie</b>	<b>93</b>
5.1	Inleiding	93
5.2	Getijasymmetrie	93
5.2.1	Werkwijze	93
5.2.2	Resultaten	94
5.3	Relatie duur opgaand tij en faseverschil 2M2-M4	101
5.4	Slotopmerkingen	103

<b>6 Samenvatting en conclusies</b>	<b>105</b>
6.1 Data-analyse	106
6.2 Verificatie van het analytische model	107
6.3 Effecten van Ingrepen volgens het analytische model	107
6.4 Beheeraspecten	108
<b>7 Referenties</b>	<b>109</b>

## 1 Achtergronden

Het onderzoeksprogramma Lange Termijn Visie Veiligheid en Toegankelijkheid (LTV V&T) voert in 2011 - 2013 studies uit, gefinancierd door zowel de Vlaamse als de Nederlandse overheid, binnen de samenwerking in de Vlaams-Nederlandse Schelde Commissie. Het programma is gericht op de fysische eigenschappen van het Schelde-estuarium. De resultaten zijn beschreven in een groot aantal rapporten. In het datarapport met betrekking tot het getij in de Westerschelde (LTV V&T G-5) is een groot aantal getijkarakteristieken, zoals hoog- en laagwater, getijslag, voortplantingssnelheid en getijasymmetrie geanalyseerd, in relatie tot volumeveranderingen. Bij de analyse van de waarnemingen is in LTV V&T G-5 ook gebruik gemaakt van een analytische oplossing voor de getijvoortplanting in een convergerend estuarium<sup>1</sup> (in vervolg aan gerefereerd als 'het analytische model').

In de loop van het onderzoeksprogramma zijn aanvullende vragen gesteld en kwamen ook nieuwe getijdata beschikbaar. Dit leidde tot een aantal kortere onderzoeksinspanningen die gezamenlijk vastgelegd worden in dit rapport.

Met de nieuwe getijdata (voor 2009 en 2010) is een aanvullende beschrijving en analyse van de evolutie van de getijslag langs het estuarium uitgevoerd. Hierbij is gekeken naar de verandering van de getijslag tijdens het afgelopen decennium (2001-2010) ten opzichte van het voorafgaande decennium (1991-2000) én in relatie tot de langjarige trend.

Aansluitend hierop is het analytische model, zoals eerder toegepast op de Westerschelde, ook gebruikt voor de Beneden-Zeeschelde. Doel hiervan is de toepasbaarheid van het model te verkennen en aanvullend inzicht te krijgen in de toename van de getijslag in relatie tot veranderingen van het watervolume in de geulen en boven de intergetijdengebieden. Met dezelfde doelstellingen is het model op ad-hoc basis toegepast bij een aantal grootschalige ingrepen, zoals zandwinning en bodemveranderingen van het Middelgat en Gat van Ossensisse. Het model is ook toegepast voor de veranderingen van de bodemligging van het Land van Saeftinge. Tenslotte is onderzocht of de waargenomen veranderingen in de getijasymmetrie met het model kunnen worden gereproduceerd door de getijvoortplanting van het hoog- en laagwater afzonderlijk te beschouwen. De getijasymmetrie is van invloed op het netto transport van sediment.

Achtereenvolgens komen aldus aan bod:

- Hoofdstuk 2: Historische ontwikkeling van de getijslag t/m 2010 voor het gehele estuarium (Westkapelle-Melle).
- Hoofdstuk 3: Toepassing analytisch model voor getijvoortplanting op de Beneden-Zeeschelde en vergelijking met historische data;
- Hoofdstuk 4: Toepassing analytisch model voor grootschalige bodemveranderingen:
  - Bodemveranderingen in macrocel 4 (Middelgat en Gat van Ossensisse)
  - Zandwinning
  - Bodemverandering Land van Saeftinge
- Hoofdstuk 5: Toepassing analytisch model voor de bepaling van de getijasymmetrie.

---

<sup>1</sup> In een convergerend estuarium nemen geometrische karakteristieken als breedte en oppervlak van het dwarsprofiel af in opwaartse richting. In het model wordt deze afname met een exponentiele relatie beschreven (Van Rijn, 2011).



## 2 Historische ontwikkeling van de getijslag t/m 2010 langs het Schelde-estuarium

In Par. 2.1 wordt ingegaan op overwegingen om de evolutie van het getij te tonen als gemiddelde van opeenvolgende tijdvakken van 10 en 19 jaar. Par. 2.2 geeft een overzicht van de gebruikte gegevens in getijstations langs het estuarium van Westkapelle/Cadzand tot Melle. De evolutie sinds 1901 van de hoog- en laagwaters en de getijslag voor opeenvolgende middelingsperioden van 10 en 19 jaar wordt getoond in Par. 2.3. Behalve de getijslag wordt ook steeds de verhouding tussen de getijslag op een punt langs het estuarium met de getijslag in Vlissingen getoond. Dit sluit aan bij rapport LTV V&T G-1. De veranderingen in die verhouding moeten veroorzaakt zijn door wijzigingen in het estuarium zelf (en niet in het signaal vanaf de Noordzee, waarin ook zeespiegelstijging en 18,6-jarige variaties in het getij voorkomen).

Het effect van de 18,6 jaar variatie kan ook voor een groot deel weg gefilterd worden door de getijkarakteristieken te middelen over perioden van 19 jaar. Op deze wijze kunnen echter alleen tijdvakken van 19 jaar onderling worden vergeleken. Daarom is in Par. 2.4 met een statistisch model voor ieder station de 18,6 jaar variatie bepaald. Vervolgens is dit deel uit het signaal verwijderd. Aansluitend hierop worden in Par. 2.5 de trends en de grootte van de 18,6-jaar variatie van de getijslag in de meetstations langs het Schelde-estuarium getoond. De samenvatting en conclusies van de analyses zijn vermeld in resp. Par. 2.6 en Par. 2.7.

### 2.1 Overwegingen

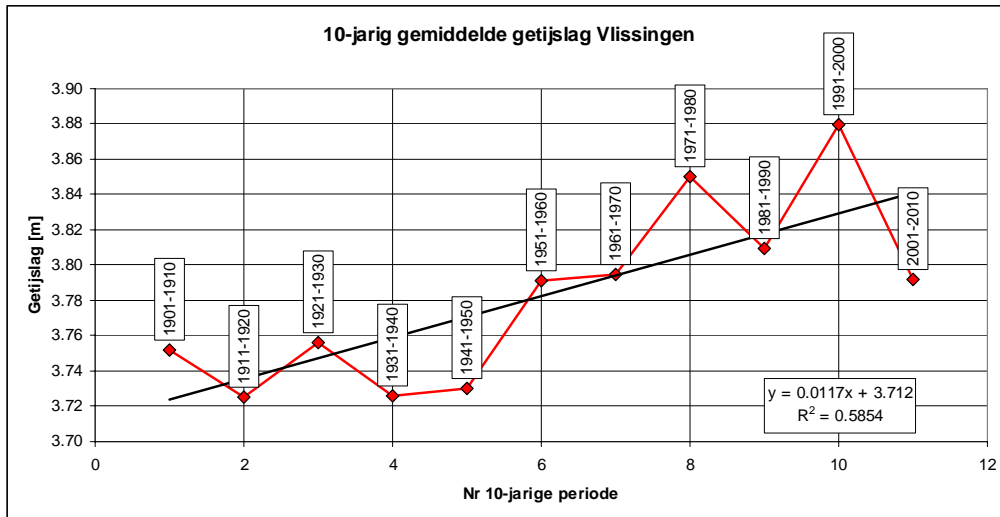
#### 2.1.1 Middeling over 10 en 19 jaar

Het verloop van het getij langs het Schelde-estuarium wordt getoond door getijkarakteristieken als het gemiddelde hoog- en laagwater (HW en LW) en het gemiddelde getijverschil voor een bepaalde periode te tonen als functie van de afstand tot Vlissingen. Om de historische ontwikkeling van de getijkarakteristieken aan te geven is het gebruikelijk om dit longitudinale verloop te laten zien als gemiddelde voor opeenvolgende perioden van 10 jaar. Omdat recent gegevens in een aantal waterstandsstations langs de Westerschelde en de Beneden- en Boven-Zeeschelde beschikbaar zijn gekomen voor de jaren 2009 en 2010 is het nu mogelijk om voor de laatste decade (2001 t/m 2010) de data voor dit tijdvak compleet te maken.

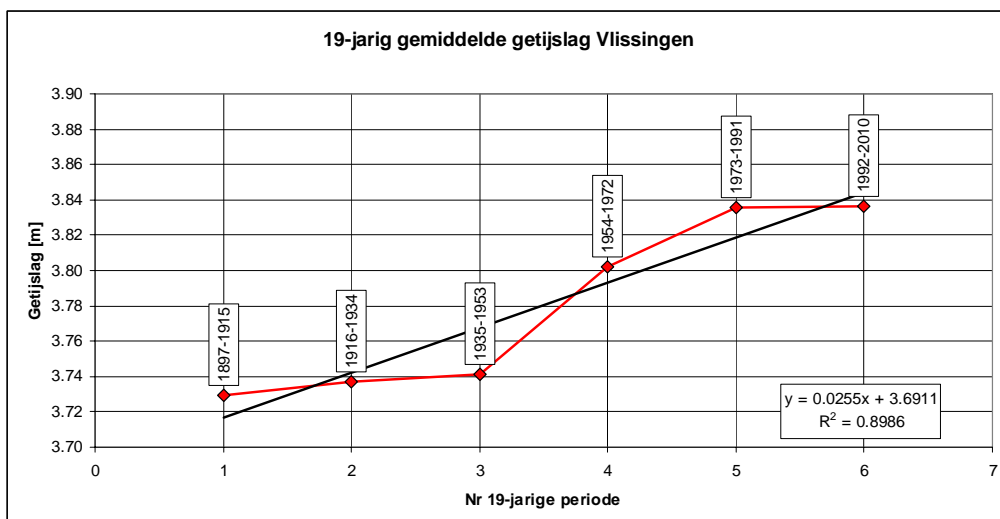
Allereerst worden de decade-gemiddelde getijkarakteristieken getoond voor de periode 1901 t/m 2010 (11 decaden). Hierbij kan sprake zijn van hiaten in de registraties; soms betreft dit 1 jaar per decade maar in een aantal gevallen zijn dit ook meerdere jaren. In het vervolg worden de decade-gemiddelde waarden alleen gepresenteerd indien maximaal twee jaren per decade ontbreken.

Bij het bepalen van de 10-jarig gemiddelde waarden kan er een variatie in de getijkarakteristieken ontstaan, als gevolg van de in het signaal aanwezige getijcomponent met een periode van 18,6 jaar. Deze periodiciteit is het gevolg van de verplaatsing van de knopen van de maanbaan langs de ecliptica (het vlak waarin de aarde rondom de zon draait). De hoog- en laagwaters en de getijslag zijn daarom ook gemiddeld over perioden van 19 jaar zodat deze variatie zoveel mogelijk wordt uitgefilterd. Als illustratie wordt voor Vlissingen de decade-gemiddelde getijslag getoond in Figuur 2.1 en de 19-jaar gemiddelde getijslag in Figuur 2.2.





Figuur 2.1: Gemiddelde getijslag in Vlissingen voor opeenvolgende perioden van 10 jaar.



Figuur 2.2: Gemiddelde getijslag in Vlissingen voor opeenvolgende perioden van 19 jaar.

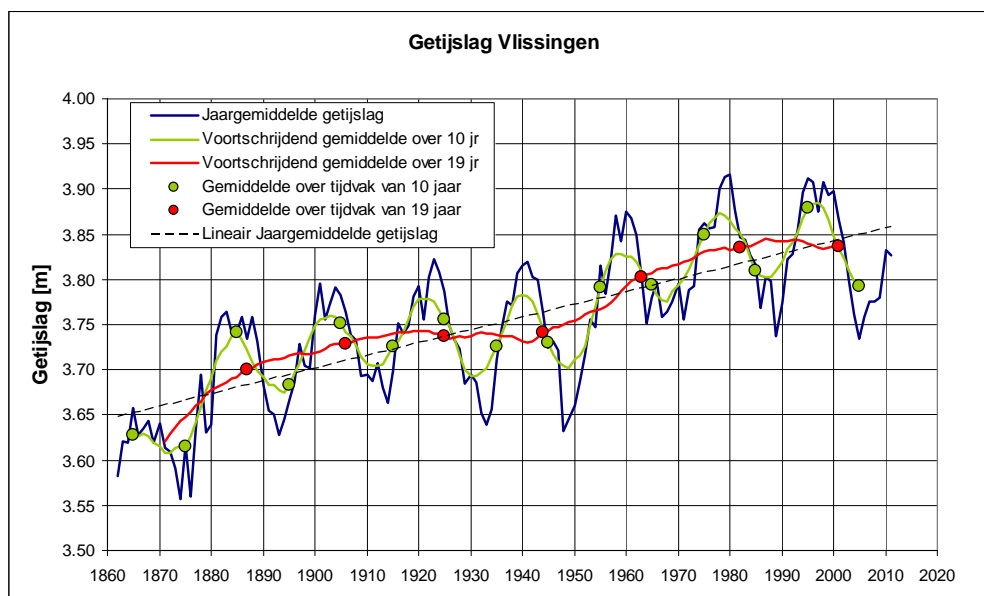
Figuur 2.1 laat zien, dat de 10-jarig gemiddelde getijslag voor opeenvolgende decaden oscilleert (een toename wordt vaak gevolgd door een afname). Bij een middeling over 19 jaar is de variatie t.o.v. de trend kleiner, zie Figuur 2.2. Er lijkt nog wel een variatie t.o.v. het lineaire verloop aanwezig te zijn met een periode van ongeveer 75 jaar (~ 4 cycli van 19 jaar in Figuur 2.2). Dit is al beschreven in LTV V&T G-5. Een verklaring is niet bekend<sup>2</sup>.

De invloed van de middeling over 10 jaar op de berekende getijslag wordt nog duidelijker getoond in Figuur 2.3a voor het station Vlissingen. In deze figuur is de groene lijn het voortschrijdend gemiddelde van de jaargemiddelde getijslag over 10 jaar zoals weergegeven met een blauwe lijn. De groene bolletjes in Figuur 2.3a zijn de waarden voor de 10-jarig gemiddelde getijslag in Figuur 2.1. Het verloop van de groene lijn toont een oscillatie, waarbij

<sup>2</sup> Mogelijke verklaringen: veranderingen in de bodem van het estuarium en het mondingsgebied of processen die zich afspelen op de Noord Atlantische Oceaan en de Noordzee evt. in wisselwerking met de meteorologie. In de literatuur wordt vaker verwezen naar variaties met een periode van 75 jaar, zie bijvoorbeeld Yndestad (2006).

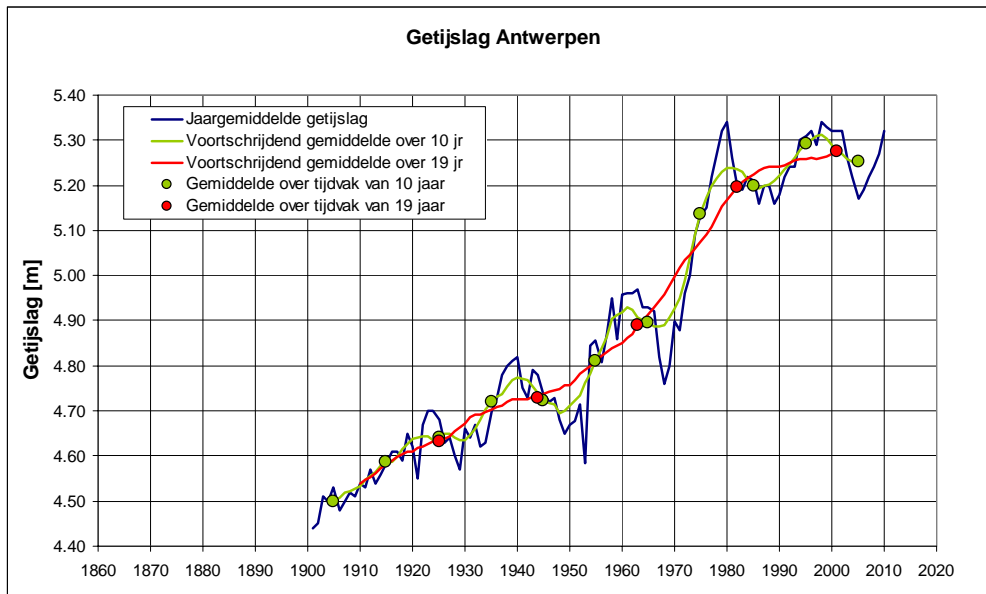
bijvoorbeeld de gemiddelde getijslag voor het tijdvak 2001-2010 bijna 0,1 m kleiner is dan de gemiddelde getijslag voor het voorafgaande tijdvak 1991-2000. Dit komt, omdat het laatste tijdvak (2001-2010) zich rond het minimum van de 18,6-jaar variatie bevindt, terwijl het tijdvak 1991-2000 rond het maximum ligt. De keuze van de middelingperiode van 10 jaar ten opzichte van de periode van de 18,6-jaar variatie is dus van invloed op de berekende gemiddelde getijslag over perioden van 10 jaar.

In Figuur 2.3a wordt eveneens de verandering van de getijslag getoond indien gemiddeld wordt over perioden van 19 jaar<sup>3</sup>. Na middeling over 19 jaar is er een residu (rode lijn) welke lijkt te bestaan uit een lineair deel en een oscillerend deel met een periode van ongeveer 75 jaar. Indien deze periodieke variatie in combinatie met de lineaire trend aanwezig blijft kan de komende decaden weer sprake zijn van een toename van dit residu, als vervolg op een periode (~ 1980-2000) waarbij het residu in Vlissingen weinig is veranderd. In LTV V&T G-5, Appendix C, Figuur C.4) is met een statistisch model de trend en langjarige variatie bepaald. Met het model wordt voorspeld, dat ten gevolge van alleen deze veranderingen in het getij in 2060 de getijslag in Vlissingen 10-15 cm groter zal zijn dan nu. De grootste toename zal dan plaatsvinden tussen globaal 2020 en 2040. Ook voor Antwerpen is de langjarige fluctuatie terug te zien gesuperponeerd op een grotere trend, zie Figuur 2.3b. Dit signaal kan echter, sterker dan in Vlissingen, beïnvloed zijn door ingrepen in het systeem zodat extrapolatie van de trend niet zonder meer geoorloofd is.



Figuur 2.3a: Jaargemiddelde getijslag en voortschrijdend gemiddelde over 19 jaar in Vlissingen voor de periode 1862 t/m 2011.

<sup>3</sup> Benadering van de 18,6-jaar periode met 19 jaar geeft een verschillfrequentie van  $1/18,6 - 1/19 \text{ jaar}^{-1}$  ofwel een zweving met een periode van ongeveer 880 jaar. Dit is dus veel groter dan de variatie met een periode van 75 jaar welke resteert na middeling over 19 jaar.



Figuur 2.3b: Jaargemiddelde getijslag en voortschrijdend gemiddelde over 19 jaar in Antwerpen voor de periode 1901 t/m 2010.

### 2.1.2 Amplificatie van de getijslag

Uit de Figuren 2.1 t/m 2.3a blijkt, dat in Vlissingen de getijslag gedurende een periode van ruim 100 jaar is toegenomen maar dat op kleinere tijdschalen de getijslag ook kan afnemen. Door de verhouding tussen de getijslag in een opwaarts station en in Vlissingen te bepalen wordt een verandering van de getijslag in het betreffende station gecorrigeerd voor veranderingen in Vlissingen op een lange tijdschaal (bv. de trendmatige toename over de afgelopen 100 jaar) en variaties over kortere perioden (bv. ten gevolge van de 18,6-jaars cyclus). De resulterende amplificatie (dit kan ook een demping zijn) representeert dan het effect van veranderingen in het systeem. Deze amplificatie of demping kan beschouwd worden als een systeemeigenschap, gegeven de geuldiepte en de waterberging boven het intergetijdengebied en in havens. In Par. 2.4 zal worden aangegeven dat de amplificatie niet helemaal onafhankelijk is van de grootte van de getijslag in Vlissingen. Voor de huidige gemiddelde geuldiepte is dit effect van de forcering gering maar bij een kleine geuldiepte kan deze invloed belangrijker worden.

Behalve de geuldiepte en de waterberging is ook de grootte van de getijslag zelf van invloed op de amplificatie c.q. demping. Dit wordt veroorzaakt door de grotere energiedissipatie bij toenemende getijslag en dus grotere stroomsnelheden. Een toename van de getijslag leidt dan, bij een onveranderlijke geometrie en bodem, tot een afname van de amplificatie c.q. toename van de demping. Dit verklaart bv. de grotere amplificatie in de Westerschelde tijdens doottij in vergelijking met springtij. De trendmatige toename van het getij in Vlissingen zou dus moeten leiden tot een afname van de amplificatie, indien het estuarium niet verder verandert.

## 2.2 Beschikbare data

Tabel 2.1 toont de meetstations die zijn geanalyseerd en het percentage beschikbare gegevens (jaargemiddelde waarden) voor de periode 1901 t/m 2010.

Tabel 2.1: Beschikbaar aantal jaargemiddelde getijkarakteristieken als percentage van het totaal aantal jaren voor de periode 1901 t/m 2010.

	Station	X	GHW	GLW	GTV
		[km]	[%]	[%]	[%]
WS	Cadzand	-16	100	61	61
WS	Westkapelle	-14	90	90	90
WS	Vlissingen	2	100	100	100
WS	Terneuzen	21	100	100	100
WS	Hansweert	36	100	100	100
WS	Bath	52	100	100	100
ZS	Liefkenshoek	63	97	93	93
ZS	Antwerpen	78	100	100	100
ZS	Schelle	91	85	85	85
ZS	Tielrode	103	94	94	94
ZS	St Amands	109	54	54	54
ZS	Dendermonde	122	98	98	98
ZS	Schoonaarde	133	98	98	98
ZS	Uitbergen	138	86	86	86
ZS	Melle	151	72	72	72

Tabel 2.2 geeft voor het hoogwater (HW), laagwater (LW) en de getijslag (GTV: getijverschil) welke decaden *niet* zijn meegenomen in de analyse (blauwe cellen), d.w.z. als 3 of meer jaargemiddelde waarden per periode van 10 jaar ontbreken ( $\geq 30\%$ ). Voor de wel gebruikte decaden geldt dat maximaal 2 jaren kunnen ontbreken.

Tabel 2.2: Decaden per meetstation waarvoor geldt dat meer dan 2 jaren ontbreken.

Station: Cadzand	Westkapelle	Vlissingen	Terneuzen	Hansweert	Bath	Liefkensh	Antwerpen	Schelle	Tielrode	St Amands	Dendermonde	Schoonaarde	Uitbergen	Melle
x = -16	-14	2.0	20.5	35.8	51.8	63.1	77.6	91.2	103.14	108.8	121.8	132.6	138.2	150.8 km
Periode	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW
1901-1910														
1911-1920	1.75	1.59	1.79	2.00	2.11	2.39	2.25	2.50	2.38	2.50	2.29	2.17	2.21	2.22
1921-1930	1.81	1.60	1.84	2.02	2.10	2.43	2.31	2.52	2.41	2.52	2.31	2.20	2.22	2.21
1931-1940	1.85	1.66	1.86	2.03	2.14	2.38	2.37	2.57	2.46	2.58	2.32	2.20	2.19	2.17
1941-1950	1.88		1.88	2.06	2.18	2.45		2.57	2.66	2.73	2.39	2.21		
1951-1960	1.95	1.71	1.95	2.11	2.26	2.50	2.53	2.63		2.83	2.76	2.52	2.31	2.29
1961-1970	1.91	1.73	1.97	2.18	2.32	2.57	2.60	2.74		2.96	2.92	2.70	2.48	2.44
1971-1980	1.92	1.76	1.99	2.22	2.33	2.61	2.69	2.82		2.95	3.03	2.99	2.72	2.47
1981-1990	1.93	1.76	2.02	2.25	2.38	2.68	2.81	2.91		3.06	3.19	3.14	2.87	2.68
1991-2000	1.95	1.81	2.07	2.29	2.43	2.73	2.86	2.96		3.12	3.25	3.22	2.95	2.74
2001-2010	1.92	1.80	2.05	2.27	2.41	2.73	2.90	2.98		3.13	3.28	3.24	2.96	2.79
Periode	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW
1901-1910														
1911-1920	-1.92	-1.67	-1.93	-2.03	-2.17	-2.22	-2.29	-2.11	-2.12	-1.61	-0.68	-0.24	-0.07	0.24
1921-1930	-1.87	-1.70	-1.92	-2.03	-2.21	-2.13	-2.31	-2.09	-2.09	-1.65	-0.73	-0.24	-0.05	0.38
1931-1940		-1.70	-1.87	-2.03	-2.19	-2.18	-2.27	-2.15	-2.16	-1.73	-0.82	-0.27	-0.08	0.25
1941-1950			-1.85	-2.00	-2.15	-2.08		-2.16	-2.08	-1.75	-0.82	-0.28		0.13
1951-1960		-1.68	-1.84	-1.96	-2.12	-2.05	-2.15	-2.18		-1.80	-1.42	-0.78	-0.29	-0.09
1961-1970		-1.68	-1.82	-1.92	-2.10	-2.01	-2.11	-2.16		-1.77	-1.45	-0.75	-0.15	0.13
1971-1980	-1.79	-1.62	-1.86	-1.97	-2.15	-2.25	-2.32	-2.29	-2.12	-1.79	-1.02	-0.30	-0.07	0.34
1981-1990	-1.73	-1.55	-1.79	-1.90	-2.03	-2.14	-2.23	-2.29	-2.27	-2.12	-1.85	-1.09	-0.41	0.36
1991-2000	-1.77	-1.57	-1.81	-1.94	-2.06	-2.17	-2.28	-2.33	-2.30	-2.15	-1.90	-1.19	-0.48	0.22
2001-2010	-1.71	-1.51	-1.74	-1.87	-2.00	-2.15	-2.23	-2.28	-2.26	-2.12	-1.89	-1.20	-0.52	0.13
Periode	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV
1901-1910														
1911-1920	3.67	3.25	3.75	3.99	4.24	4.48	4.50	4.50	4.38	4.11	2.81	2.19	2.01	1.65
1921-1930	3.68	3.30	3.76	4.05	4.32	4.56	4.59	4.64	4.51	4.17	2.95	2.37	2.20	1.84
1931-1940		3.35	3.73	4.07	4.33	4.57	4.64	4.72	4.62	4.31	3.14	2.48	2.27	1.96
1941-1950			3.73	4.06	4.33	4.53		4.72	4.74	4.48	3.20	2.48		2.04
1951-1960		3.39	3.79	4.07	4.38	4.55	4.67	4.81		4.63	4.19	3.31	2.61	2.38
1961-1970		3.41	3.79	4.10	4.41	4.58	4.71	4.90		4.72	4.37	3.45	2.63	2.31
1971-1980	3.72	3.38	3.85	4.19	4.48	4.76	4.93	5.14	5.24	5.14	4.78	3.74	2.76	2.43
1981-1990	3.66	3.31	3.81	4.16	4.41	4.82	5.04	5.20	5.33	5.31	4.99	3.96	3.09	2.77
1991-2000	3.72	3.37	3.88	4.23	4.49	4.90	5.13	5.29	5.42	5.40	5.12	4.14	3.22	2.92
2001-2010	3.63	3.31	3.79	4.14	4.41	4.88	5.14	5.25	5.39	5.41	5.13	4.16	3.30	2.61

Hetzelfde wordt in Tabel 2.3 getoond voor de 19-jaars perioden. Hierbij geldt dat de betreffende periode niet wordt meegenomen in de analyse indien 5 of meer jaargemiddelde waarden ontbreken (> 26%).

Tabel 2.3: 19-jaar perioden per meetstation waarvoor geldt dat meer dan 4 jaren ontbreken.

Station: Cadzand	Westkapel	Vlissingen	Terneuzen	Hansweert	Bath	Liefkensh	Antwerpen	Schelle	Tielrode	St Amand	Dendermo	Schoona	Uitbergen	Melle	
x =	-16	-14	2.0	20.5	35.8	51.8	63.1	77.6	91.2	103.14	108.8	121.8	132.6	138.2	150.8 km
Periode	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW	HW
1897-1915	1.75		1.78	1.93	2.06	2.28	2.21	2.42							
1916-1934	1.79	1.60	1.82	2.01	2.11	2.41	2.30	2.51	2.40	2.52		2.30	2.19	2.21	2.20
1935-1953	1.89		1.89	2.06	2.18	2.43	2.42	2.58	2.61	2.71		2.39	2.24		
1954-1972	1.92	1.73	1.96	2.16	2.29	2.54	2.57	2.70		2.92	2.87	2.63	2.40	2.35	
1973-1991	1.93	1.76	2.02	2.25	2.37	2.66	2.77	2.88	3.02	3.13	3.09	2.82	2.60	2.50	2.40
1992-2010	1.94	1.81	2.06	2.29	2.42	2.74		2.98	3.13	3.27	3.24	2.96	2.77	2.70	2.68

Periode	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW	LW
1897-1915			-1.95	-2.05	-2.16	-2.18	-2.30	-2.10							
1916-1934	-1.89	-1.69	-1.92	-2.03	-2.20	-2.14	-2.29	-2.12	-2.10	-1.65		-0.73	-0.25	-0.05	0.26
1935-1953			-1.85	-2.01	-2.15	-2.11		-2.15	-2.11	-1.72		-0.79	-0.25		
1954-1972		-1.61	-1.84	-1.94	-2.12	-2.04	-2.14	-2.19		-1.83	-1.48	-0.80	-0.23	0.01	
1973-1991	-1.76	-1.59	-1.82	-1.93	-2.08	-2.15	-2.25	-2.31	-2.29	-2.13	-1.84	-1.08	-0.37	-0.15	0.34
1992-2010	-1.74	-1.54	-1.77	-1.90	-2.03	-2.16		-2.30	-2.28	-2.13	-1.89	-1.19	-0.49	-0.26	0.18

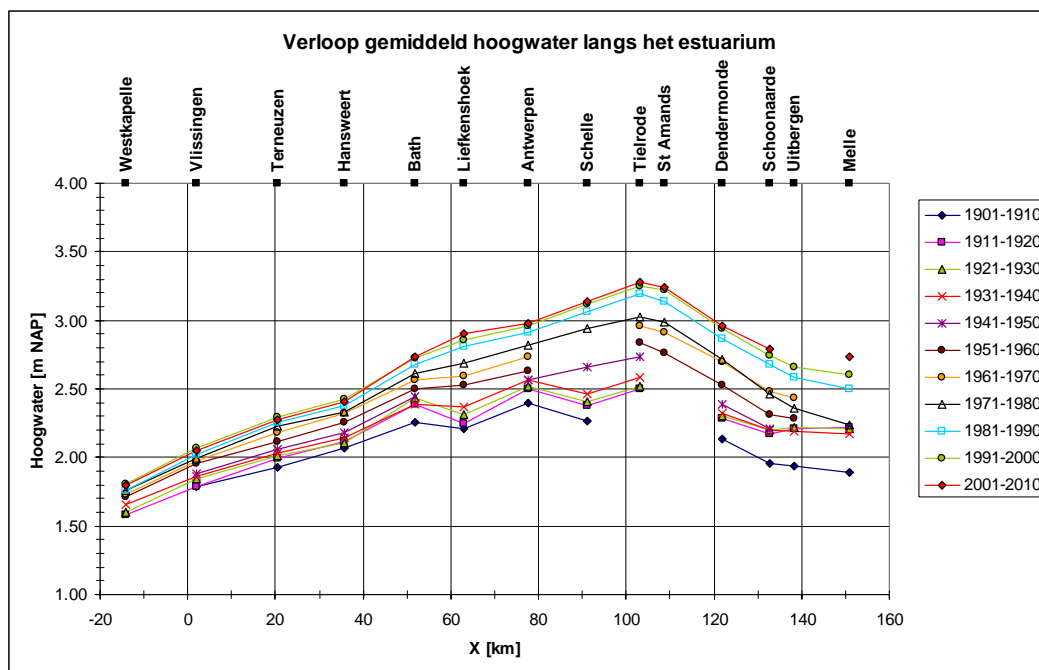
Periode	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV	GTV
1897-1915			3.73	3.98	4.22	4.46	4.51	4.52							
1916-1934	3.68	3.29	3.74	4.04	4.31	4.56	4.59	4.63	4.50	4.17		3.03	2.44	2.26	1.94
1935-1953			3.74	4.07	4.33	4.54		4.73	4.72	4.43		3.18	2.49		
1954-1972		3.34	3.80	4.10	4.41	4.58	4.72	4.89		4.75	4.35	3.43	2.63	2.34	
1973-1991	3.69	3.35	3.84	4.18	4.45	4.81	5.01	5.20	5.31	5.26	4.93	3.90	2.97	2.65	2.05
1992-2010	3.68	3.34	3.84	4.19	4.45	4.89		5.27	5.41	5.41	5.13	4.15	3.27	2.96	2.50

## 2.3 10- en 19-jaargemiddelde getijkarakteristieken

De jaargemiddelde getijkarakteristieken worden geanalyseerd na middeling over respectievelijk 10 en 19 jaar. Eerst worden de resultaten getoond voor alle opeenvolgende tijdvakken van 10 resp. 19 jaar sinds 1901. Aansluitend worden de resultaten van het laatste tijdvak (2001-2010 resp. 1992-2010) vergeleken met het voorlaatste tijdvak (1991-2000 resp. 1973-1991).

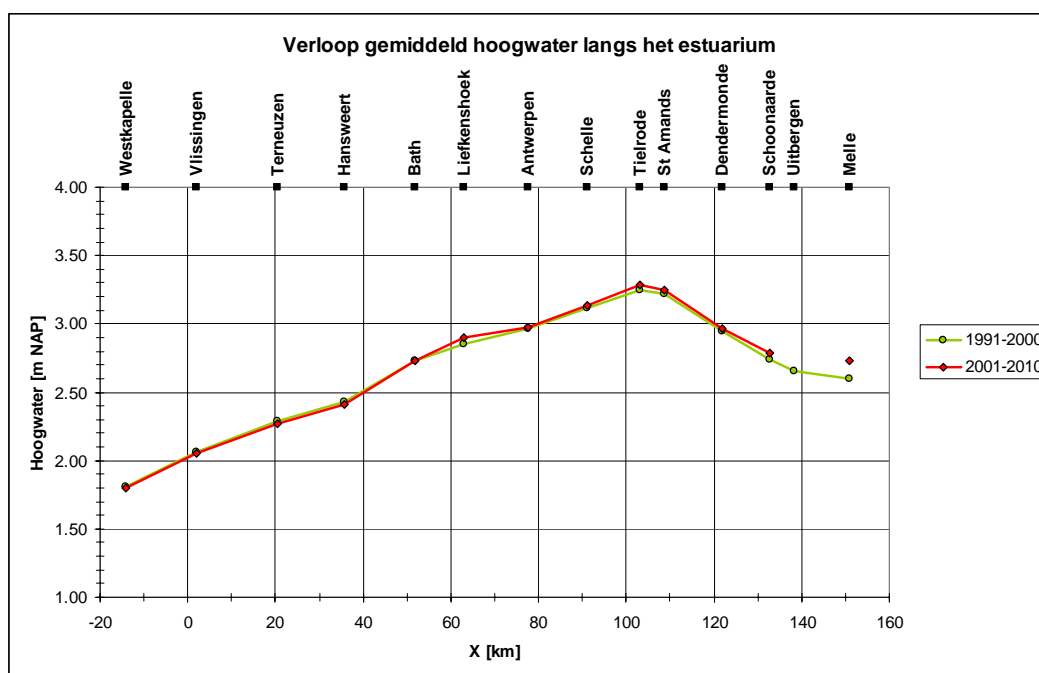
### 2.3.1 Middeling over 10 jaar

Het verloop van het hoogwater als gemiddelde voor opeenvolgende perioden van 10 jaar tussen 1901 en 2010 wordt getoond in Figuur 2.4a.



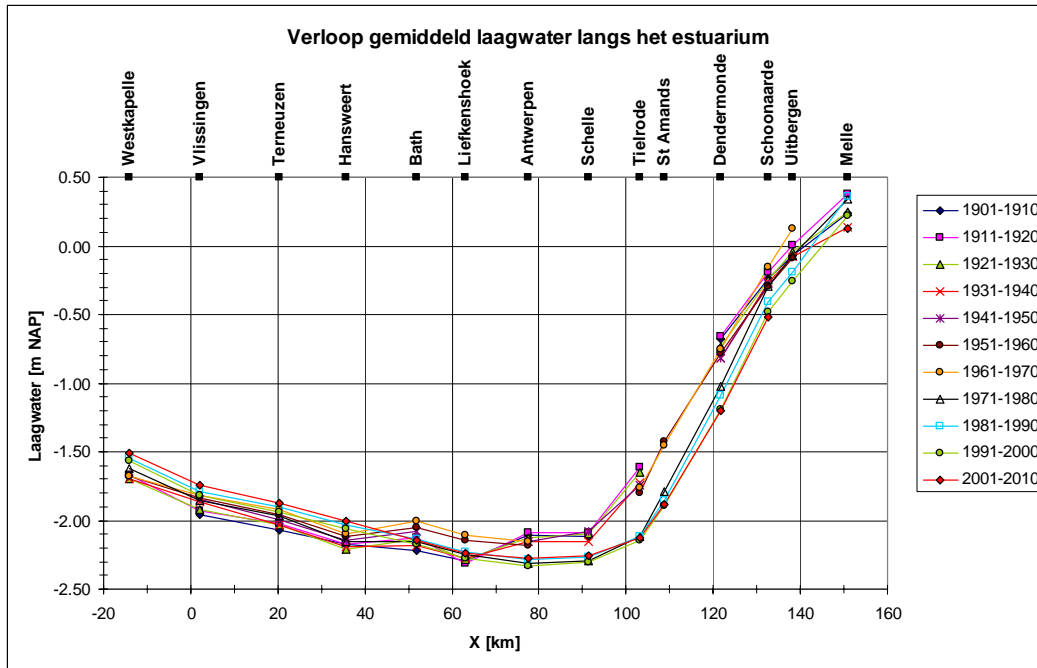
Figuur 2.4a: 10-jarig gemiddeld hoogwater voor opeenvolgende decaden tussen 1901 en 2010.

Figuur 2.4a laat zien dat het gemiddelde hoogwater sinds 1901 in het gehele estuarium is toegenomen. De toename is al aanwezig op de benedenstroomse rand maar de toename is groter in het opwaartse deel. Figuur 2.4b toont de vergelijking tussen de twee beide laatste perioden van 10 jaar. Hieruit blijkt, dat de hoogwaters tijdens deze perioden vrijwel hetzelfde zijn gebleven. De grootste verandering betreft de toename van 0,13 m in Melle.



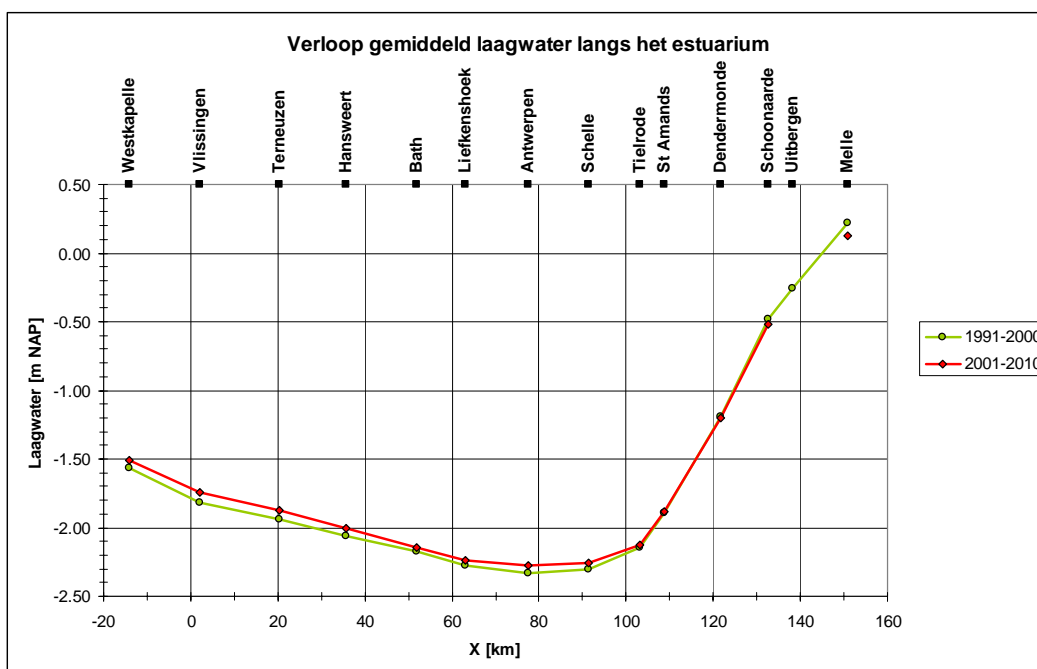
Figuur 2.4b: 10-jarig gemiddeld hoogwater voor 1991-2000 en 2001-2010.

De gemiddelde laagwaters voor opeenvolgende perioden van 10 jaar sinds 1901 zijn weergegeven in Figuur 2.5a. De laagwaters in het westelijk deel zijn gestegen, terwijl zij in het oostelijk deel zijn gedaald. Het omslagpunt ligt nabij Liefkenshoek.



Figuur 2.5a: 10-jarig gemiddeld laagwater voor opeenvolgende decaden tussen 1901 en 2010.

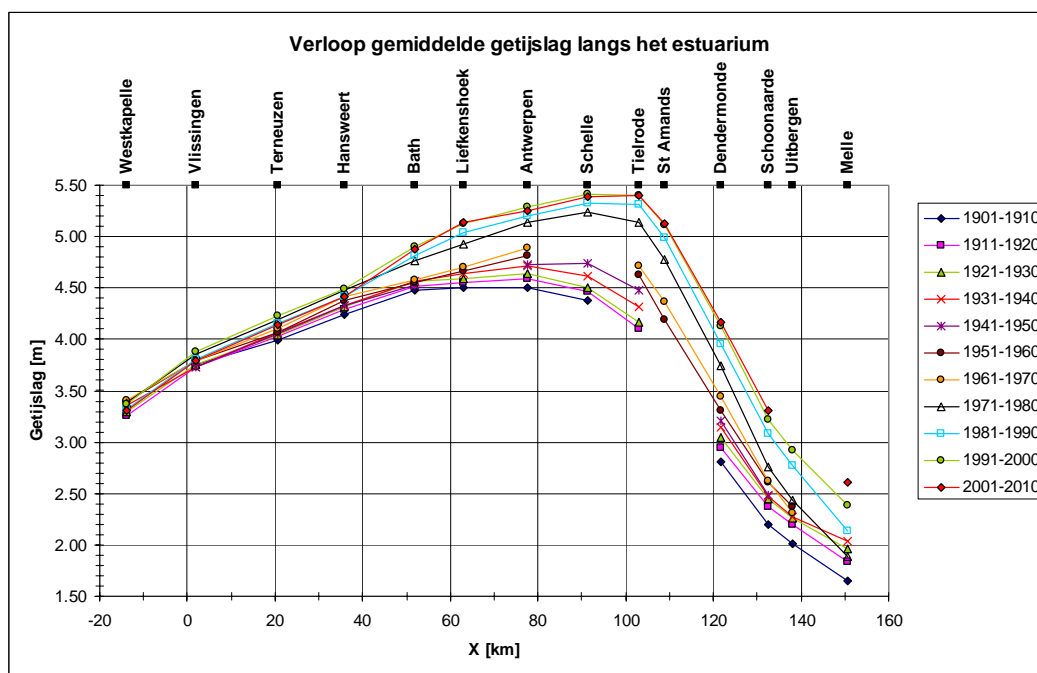
Figuur 2.5b toont de beide laatste 10-jarige perioden. Afwaarts van Tielrode zijn de laagwaters licht gestegen, terwijl zij opwaarts van Tielrode gelijk zijn gebleven of iets zijn gedaald.



Figuur 2.5b: 10-jarig gemiddeld laagwater voor 1991-2000 en 2001-2010.

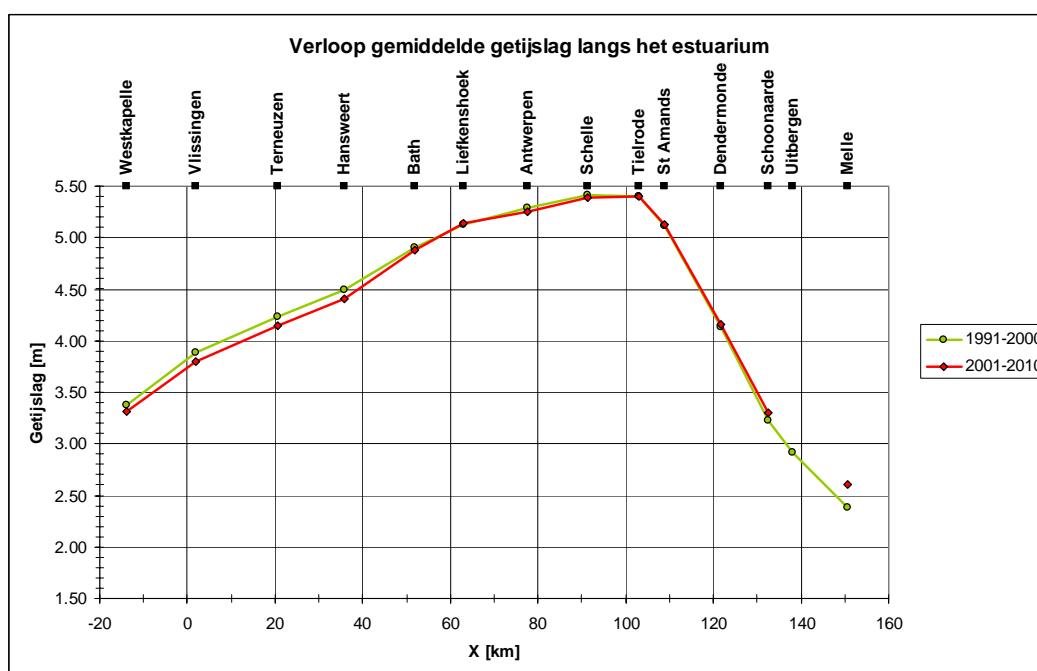


Figuur 2.6a toont de getijslag, gemiddeld over 10 jaar, voor opeenvolgende decaden sinds 1901. De figuur laat zien dat de getijslag vooral in het midden en oosten is toegenomen.



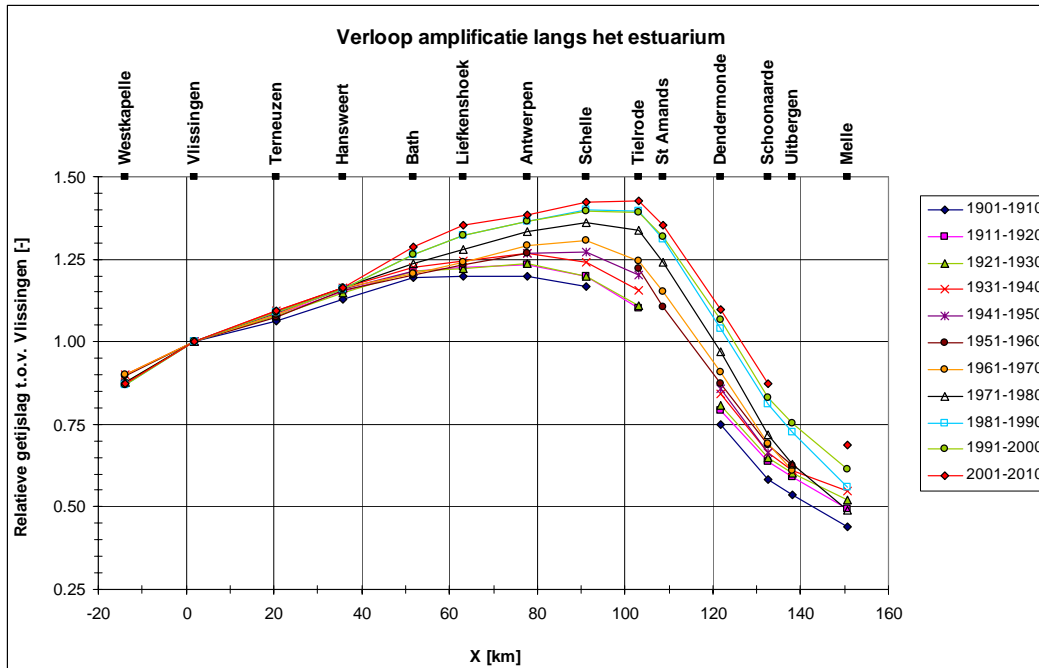
Figuur 2.6a: 10-jarig gemiddelde getijslag voor opeenvolgende decaden tussen 1901 en 2010.

De vergelijking tussen de beide laatste decaden wordt getoond in Figuur 2.6b. Afwaarts van Bath is de getijslag afgenomen, terwijl oostelijk hiervan de getijslag vrijwel gelijk is gebleven (in Melle is er een geringe toename).

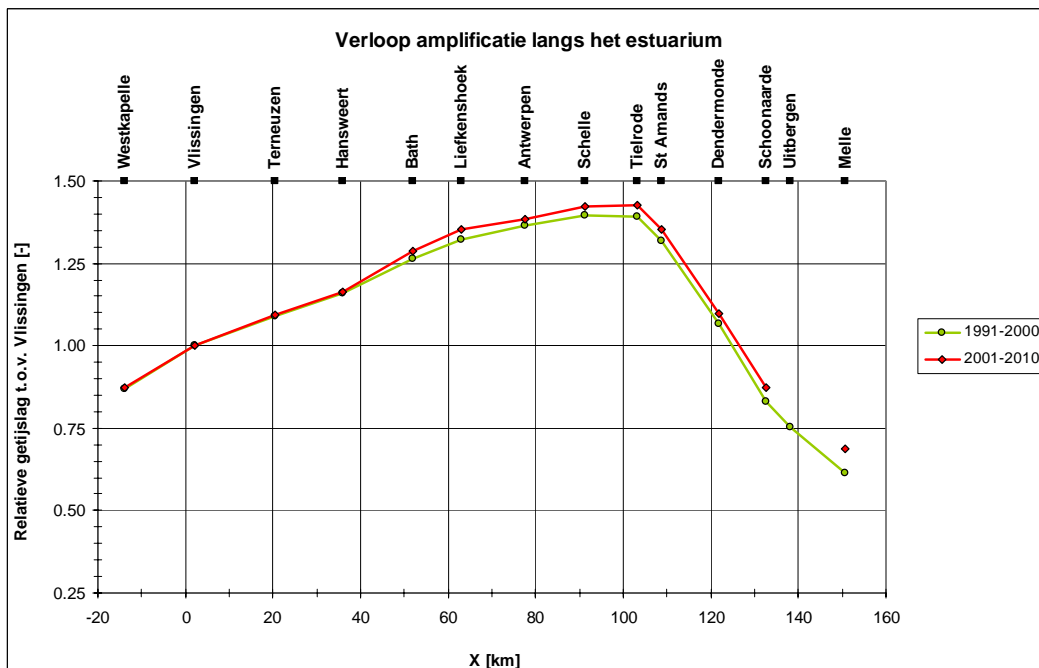


Figuur 2.6b: 10-jarig gemiddelde getijslag voor 1991-2000 en 2001-2010.

De amplificatie van de getijslag t.o.v. Vlissingen als gemiddelde voor opeenvolgende decaden sinds 1901 wordt getoond in Figuur 2.7a. Figuur 2.7b toont de laatste twee decaden.



Figuur 2.7a: 10-jarig gemiddelde amplificatie t.o.v. Vlissingen voor opeenvolgende decaden tussen 1901 en 2010.



Figuur 2.7b: 10-jarig gemiddelde amplificatie t.o.v. Vlissingen voor 1991-2000 en 2001-2010.

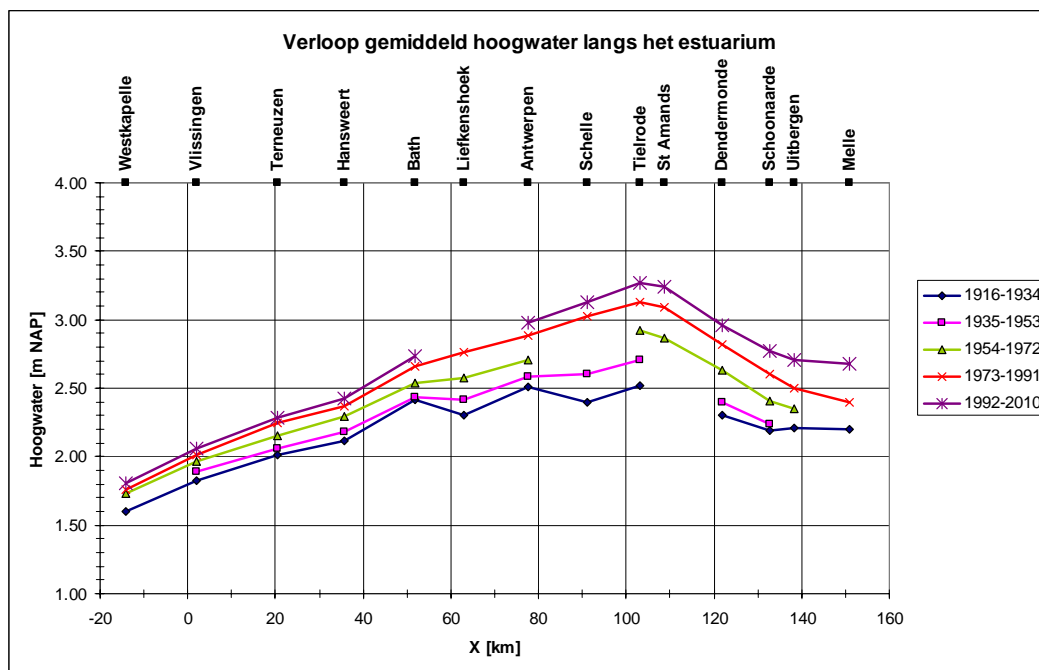
Figuren 2.7a laat zien dat opwaarts van Hansweert de amplificatie voor alle opeenvolgende decaden (behalve tussen 1981-1990 en 1991-2000 in het middendeel van het estuarium) is

toegenomen. Een toename van de getijslag ter plaatse van de benedenstroomse rand (Vlissingen), zoals sinds begin 20<sup>e</sup> eeuw wordt waargenomen zou, samen met een bodem die niet in de tijd is veranderd, juist leiden tot een geringere amplificatie, door de grotere energiedissipatie. Kennelijk is dit niet het geval geweest en zijn er veranderingen in geometrie en bodemligging geweest die de toegenomen amplificatie hebben veroorzaakt. Figuur 2.7b illustreert de toename van de amplificatie gedurende laatste twee decaden bovenstrooms van Hansweert.

Bij het voorgaande hoort nog een nuancering. Een grotere getijslag leidt tot een grotere berging welke mede wordt beïnvloed door de vorm van het estuarium (hypsometrie). Verder zijn hogere hoog- en lagere laagwaterstanden van invloed op de hydraulische ruwheid, waarbij het netto effect op de getijslag niet nul hoeft te zijn. Of deze nuances een rol spelen in de hier besproken observaties zou onderzocht kunnen worden met een numeriek model.

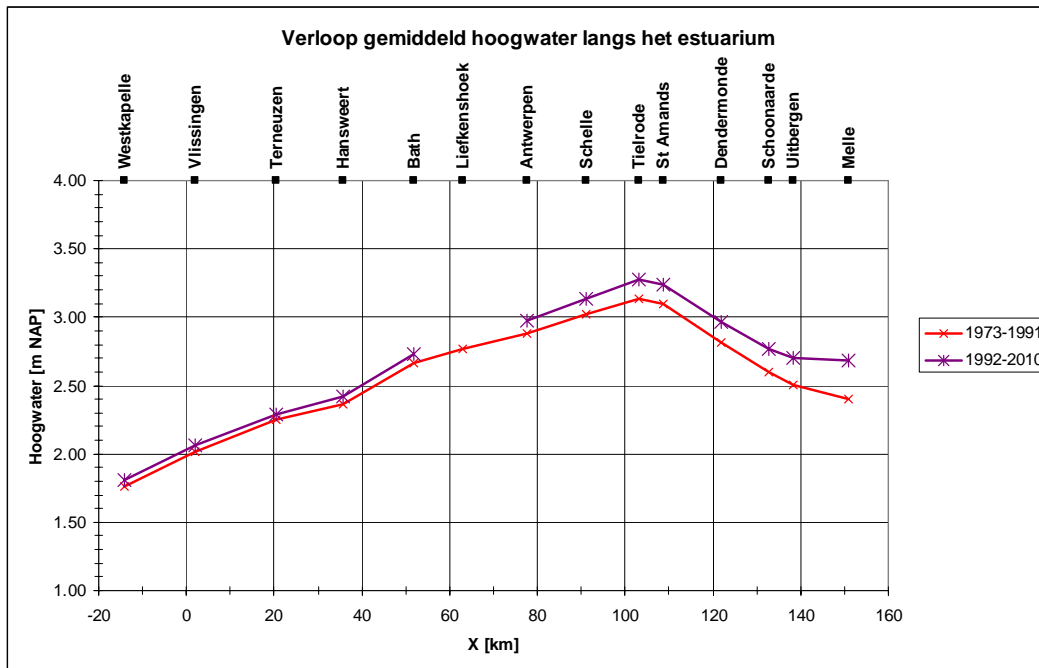
### 2.3.2 Middeling over 19 jaar

Het verloop van het hoogwater als gemiddelde voor opeenvolgende perioden van 19 jaar tussen 1916 en 2010 wordt getoond in Figuur 2.8a. Conform de analyse voor de 10-jarige perioden blijkt, dat de hoogwaters sinds het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw zijn toegenomen.



Figuur 2.8a: 19-jarig gemiddeld hoogwater voor opeenvolgende perioden tussen 1916 en 2010.

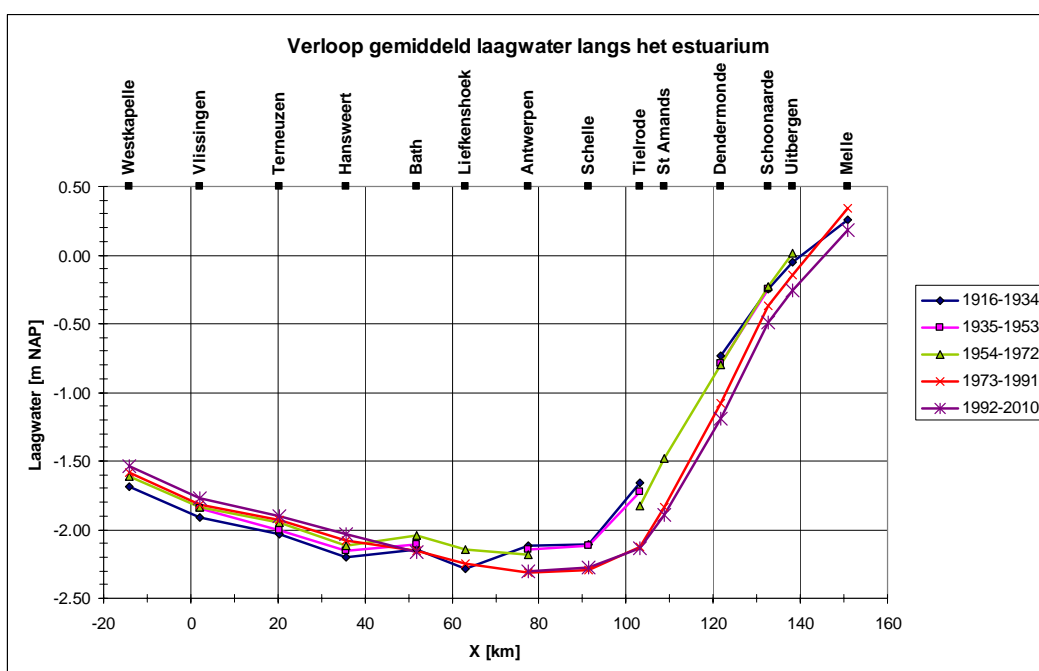
De resultaten van de laatste periode van 19 jaar (1992 t/m 2010) worden in Figuur 2.8b getoond, in relatie tot de periode ervoor (1973 t/m 1991).



Figuur 2.8b: 19-jarig gemiddeld hoogwater voor 1973-1991 en 1992-2010.

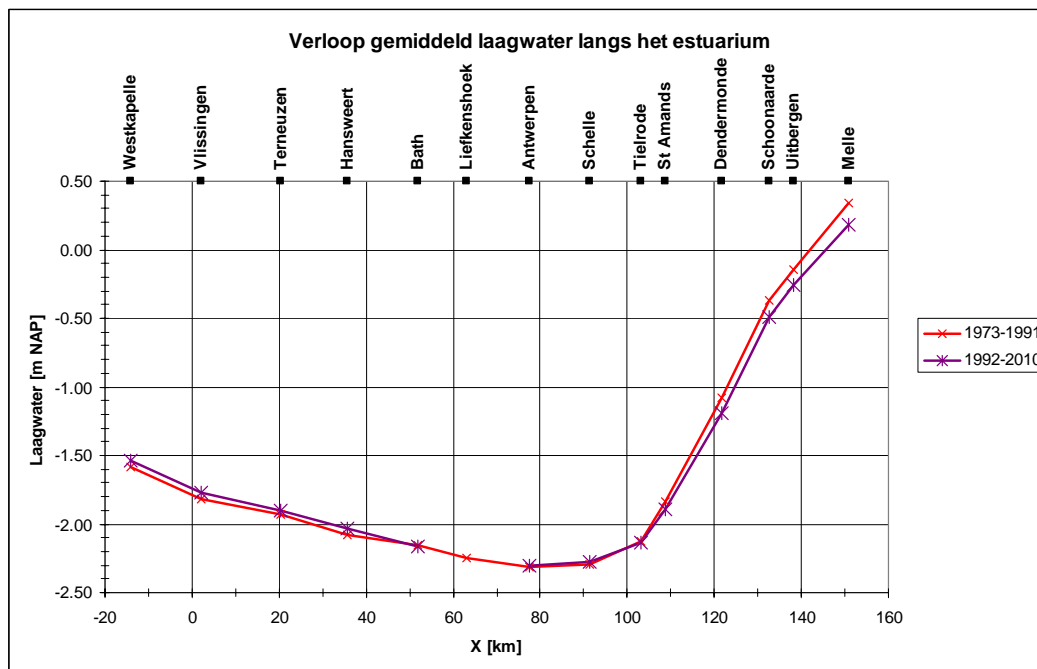
Het gemiddelde hoogwater tijdens de laatste 19-jarige periode is hoger dan het gemiddelde hoogwater tijdens de voorafgaande periode. De toename is ter plaatse van de zeewaartse rand al aanwezig maar neemt toe in opwaartse richting.

Het gemiddeld laagwater voor opeenvolgende perioden van 19 jaar wordt getoond in Figuur 2.9a. De laagwaters afwaarts van Hansweert-Bath zijn gestegen terwijl zij in Bath en opwaarts hiervan zijn gedaald.



Figuur 2.9a: 19-jarig gemiddeld laagwater voor opeenvolgende perioden tussen 1916 en 2010.

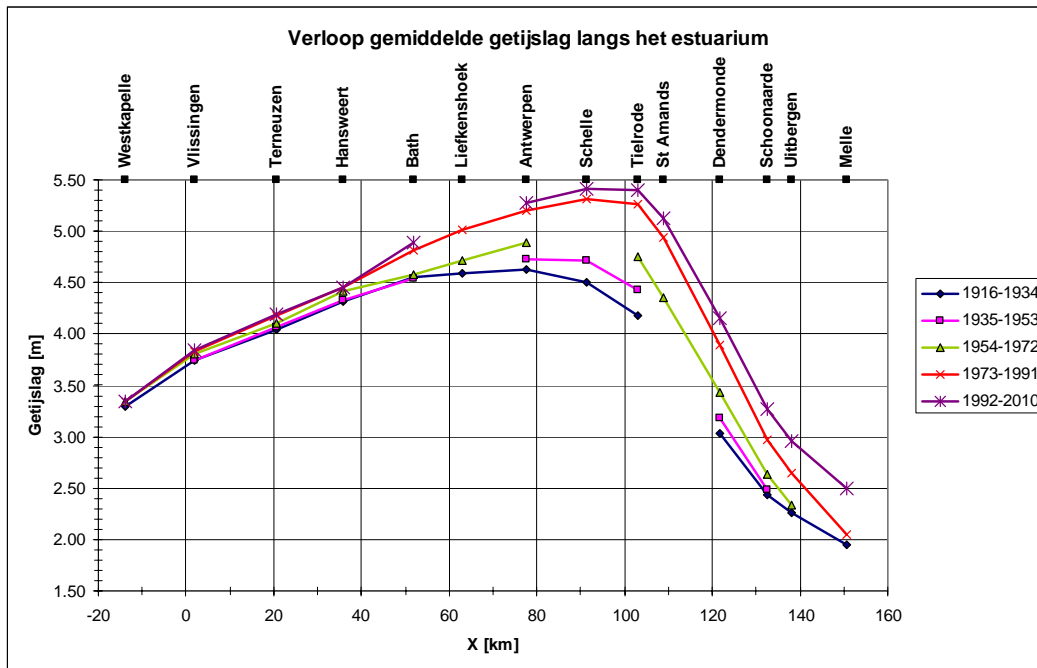
De laagwaters voor de beide laatste 19-jarige perioden worden getoond in Figuur 2.9b.



Figuur 2.9b: 19-jarig gemiddeld laagwater voor 1973-1991 en 1992-2010.

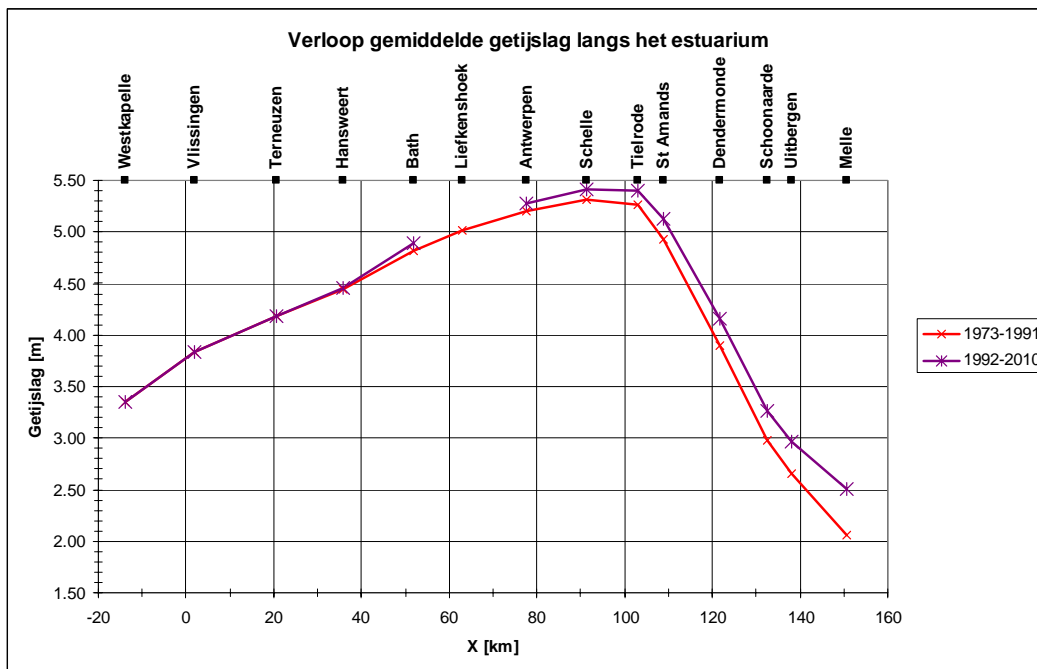
De verschillen tussen de laagwaters voor beide perioden zijn gering met een lichte stijging afwaarts van Bath en een geringe daling opwaarts van Tielrode.

De gemiddelde getijslag voor de opeenvolgende perioden van 19 jaar sinds 1901 is weergegeven in Figuur 2.10a. De figuur toont een toename van de getijslag langs het gehele estuarium, maar vooral in het centrale en opwaartse deel.



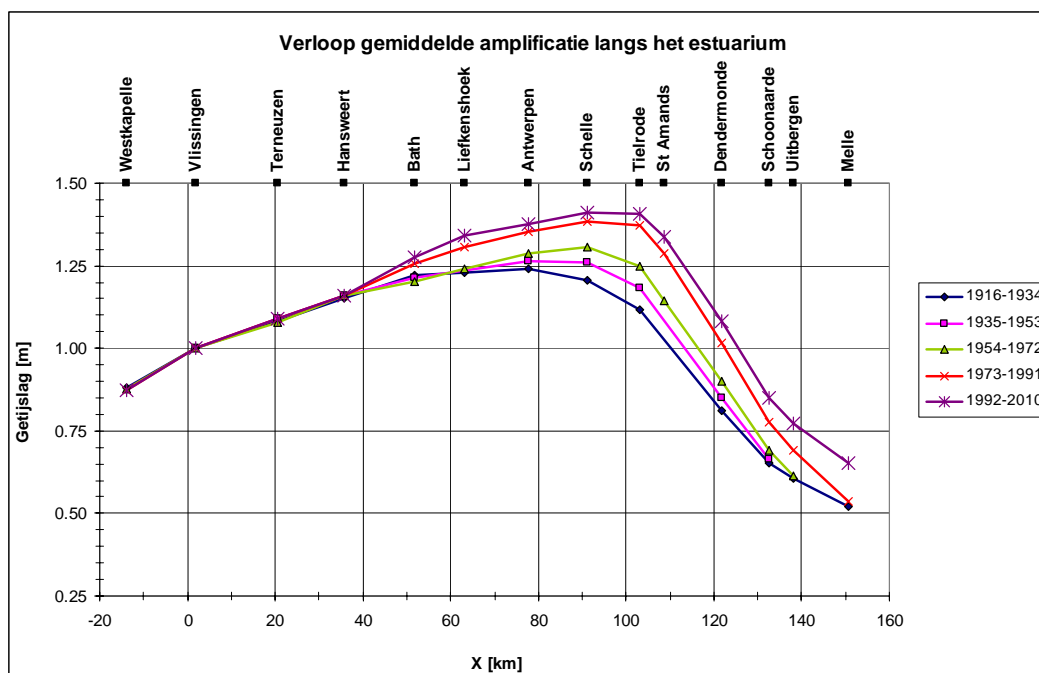
Figuur 2.10a: 19-jarig gemiddelde getijslag voor opeenvolgende perioden tussen 1916 en 2010.

De getijslag voor beide laatste 19-jarige perioden wordt getoond in Figuur 2.10b. Afwaarts van Hansweert is de getijslag gelijk voor beide perioden terwijl in Bath en opwaarts sprake is van een toename.

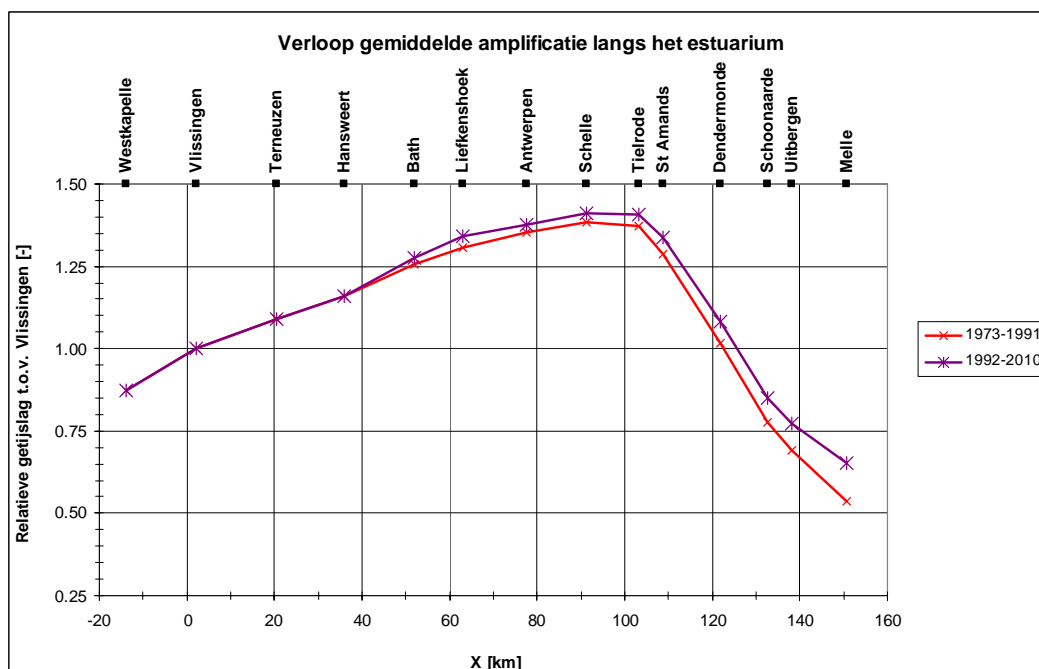


Figuur 2.10b: 19-jarig gemiddelde getijslag voor 1973-1991 en 1992-2010.

De amplificatie van de getijslag t.o.v. Vlissingen is weergegeven in Figuur 2.11a (vanaf 1901) en Figuur 2.11b (laatste twee perioden van 19 jaar). Gedurende deze periode is bovenstrooms van Hansweert sprake van een toename van de amplificatie.



Figuur 2.11a: 19-jarig gemiddelde amplificatie t.o.v. Vlissingen voor opeenvolgende perioden tussen 1916 en 2010.



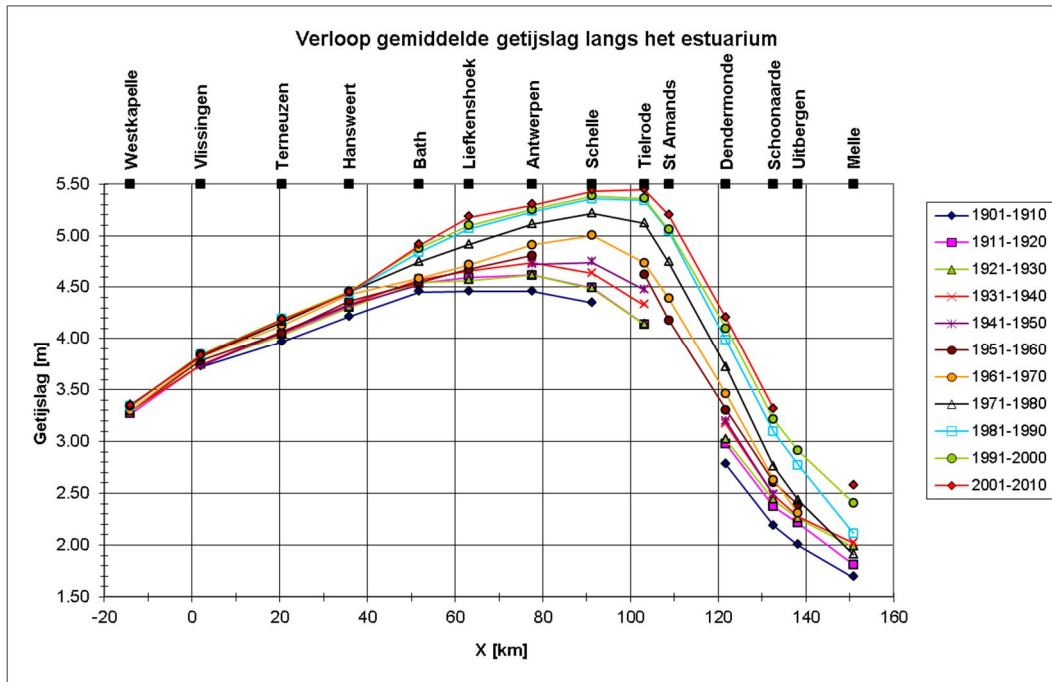
Figuur 2.11b: 19-jarig gemiddelde amplificatie t.o.v. Vlissingen voor 1973-1991 en 1992-2010.

## 2.4 Analyse na verwijdering 18,6-variatie

In Par. 2.1 is aangegeven, dat de afgeleide getijkarakteristieken voor perioden van 10 jaar mede worden bepaald door de 18,6-jaar variatie (zie groene lijn en bolletjes in Fig. 1.3a+b). Deze paragraaf toont de resultaten wanneer eerst de 18,6-jaars variatie in alle meetstations

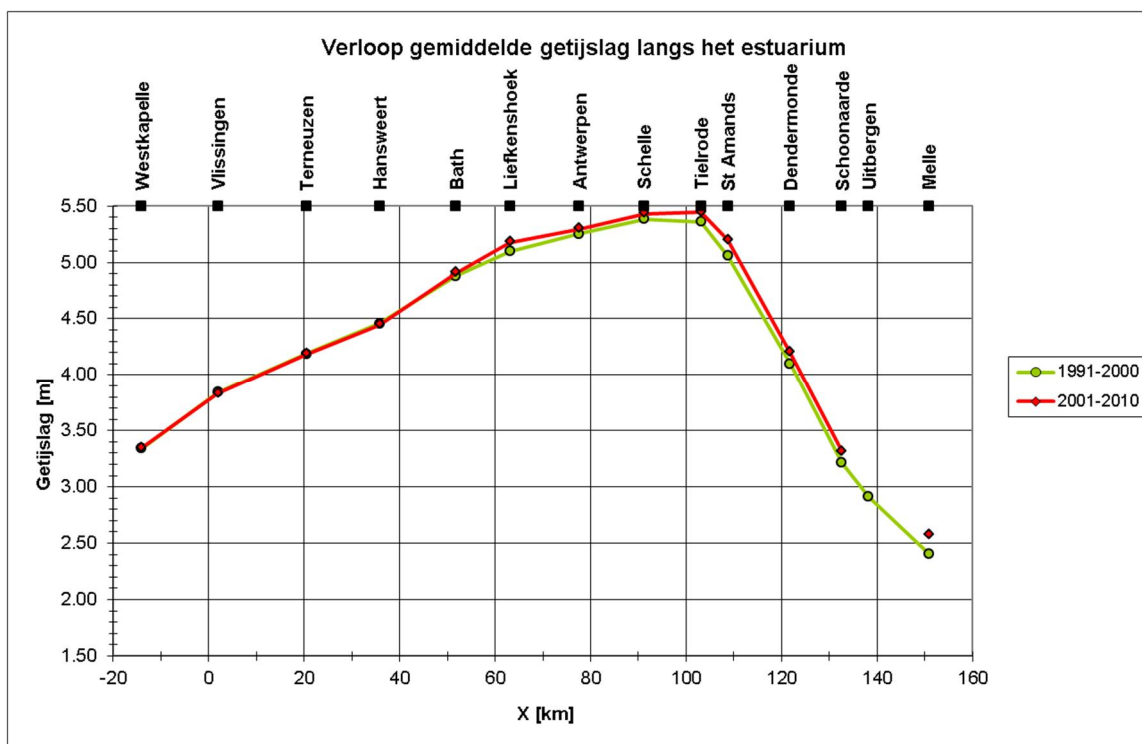


wordt bepaald (op basis van de jaargemiddelde waarden) en vervolgens uit het signaal wordt verwijderd. Figuur 2.12a toont de dan resulterende getijslag langs het estuarium voor alle decaden sinds 1901.



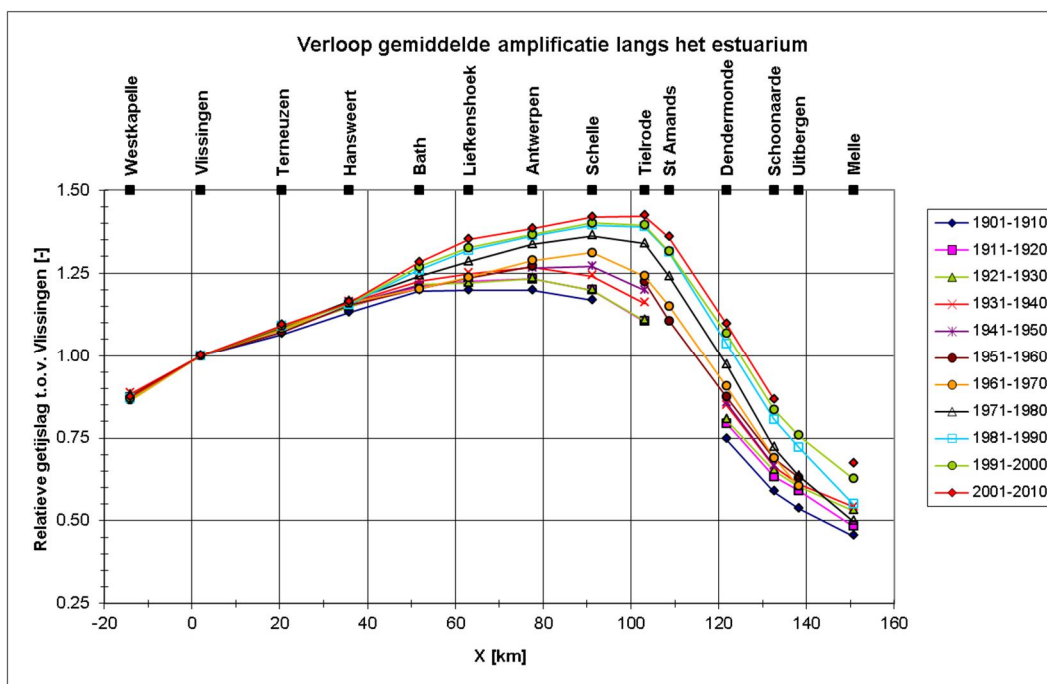
Figuur 2.12a: Verloop getijslag langs het estuarium na verwijdering 18,6-jaar variatie voor opeenvolgende decaden gedurende de periode 1901-2010.

Figuur 2.12a toont, dat de getijslag gecorrigeerd voor de 18,6-jaar periode tussen 1901 en 2010 een systematische toename laat zien. In Westkapelle en Vlissingen is al sprake van een toename, maar westelijk van Hansweert blijft de toename beperkt. Vanaf Bath zijn de opgetreden veranderingen groter. Figuur 2.12b toont dat ook voor de twee laatste decaden sprake is van een toename van de getijslag in Bath en opwaarts. Voor het traject Westkapelle-Bath geldt dat de getijslag hetzelfde is gebleven.



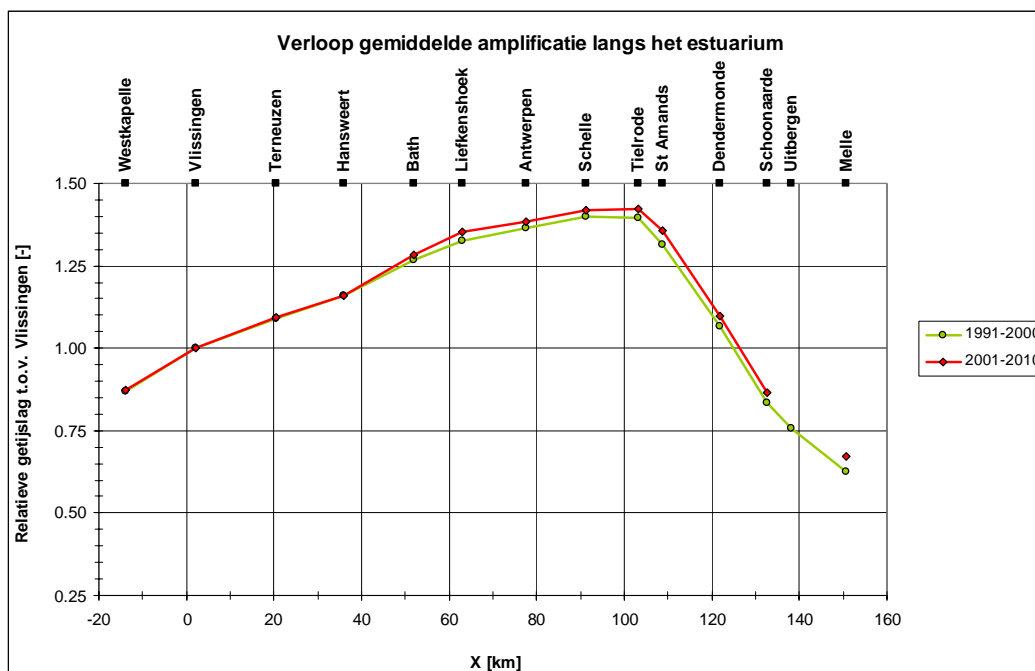
Figuur 2.12b: Verloop getijslag langs het estuarium na verwijdering 18,6-jaar variatie voor 1991-2000 en 2001-2010.

In Figuur 2.13a is de amplificatie van de getijslag t.o.v. Vlissingen weergegeven voor alle decaden sinds 1901. Hieruit blijkt, dat de amplificatie t.o.v. Vlissingen in het gehele estuarium is toegenomen, vooral opwaarts van Hansweert.



Figuur 2.13a: Verloop amplificatie getijslag t.o.v. Vlissingen langs het estuarium na verwijdering 18,6-jaar variatie voor opeenvolgende decaden gedurende de periode 1901-2010.

Figuur 2.13b toont voor de twee laatste decaden (1991-2000 en 2001-2010) de amplificatie van de getijslag tussen Westkapelle en Melle. De amplificatie tussen 2001 en 2010 in Bath en opwaarts hiervan is groter dan tijdens de voorafgaande periode 1991-2000. De toename in Liefkenshoek is hierbij wat groter dan in de twee naburige stations Bath en Antwerpen. Over het traject Westkapelle-Hansweert is de amplificatie vrijwel onveranderd gebleven.



Figuur 2.13b: Verloop amplificatie getijslag t.o.v. Vlissingen langs het estuarium na verwijdering 18,6-jaar variatie voor 1991-2000 en 2001-2010.

De toename van de getijslag in het estuarium wordt veroorzaakt door een toename van de getijslag in de mond (Vlissingen) en een toename van de amplificatie van de getijslag. Om de effecten van beide oorzaken te kunnen onderscheiden wordt de getijslag  $G$  in een station  $S$  op het nieuwe tijdstip  $t_1$  ( $G_S^1$ ) geschreven als:

$$\begin{aligned} G_S^1 &= \alpha_{V-S}^1 G_V^1 \\ &= \alpha_{V-S}^0 G_V^1 + (\alpha_{V-S}^1 - \alpha_{V-S}^0) G_V^1 \end{aligned} \quad (2.1)$$

(term1)                      (term2)

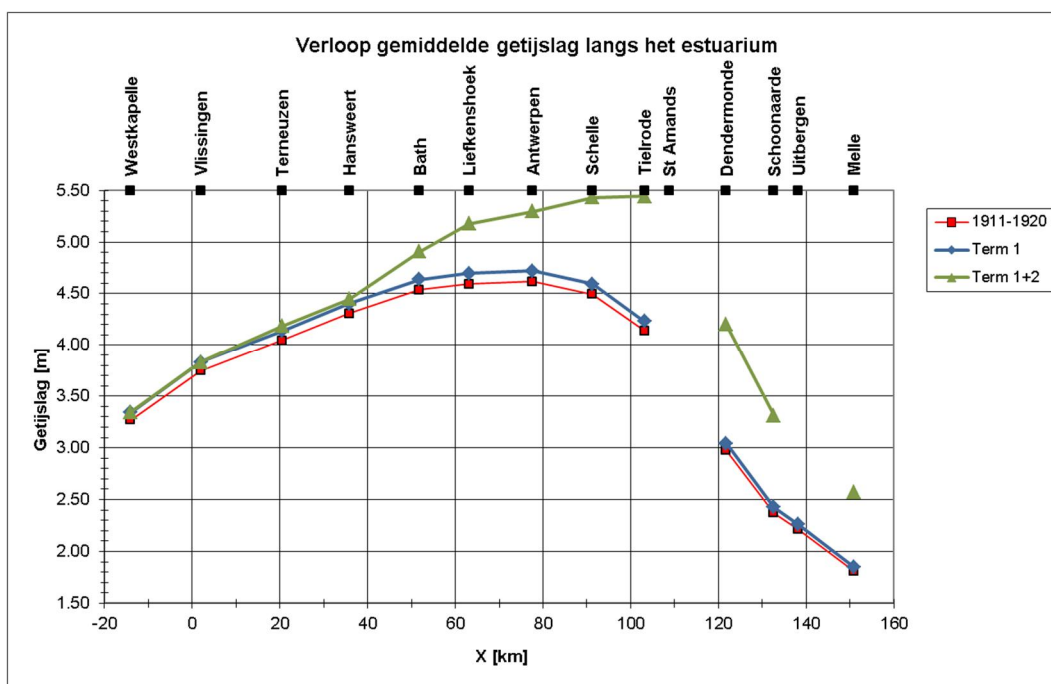
De eerste term in het rechterlid is de getijslag in station  $S$  op het nieuwe tijdstip berekend met de amplificatie  $\alpha_{V-S}^0$  op het tijdstip  $t_0$  en de nieuwe getijslag in Vlissingen ( $G_V^1$ ). De tweede term vormt de bijdrage aan de getijslag in station  $S$  op het nieuwe tijdstip als gevolg van de verandering van de amplificatie. Omdat  $G_V^1 = G_V^0 + \Delta G_V$  en  $G_S^1 = G_S^0 + \Delta G_S$  waarin  $\Delta G_V$  en  $\Delta G_S$  de absolute veranderingen zijn van de getijslag in Vlissingen en station  $S$  volgt uit vgl. (2.1):

$$\Delta G_S = \alpha_{V-S}^0 \Delta G_V + \Delta \alpha_{V-S} G_V^1 \quad (2.2)$$

met  $\Delta\alpha_{V-S}$  de absolute verandering van de amplificatie in station S t.o.v. Vlissingen.

Indien de amplificatie niet verandert, is de toename van de getijslag in station S dus een factor  $\alpha_{V-S}^0$  groter dan de toename van de getijslag in Vlissingen. Een toename van de amplificatie resulteert in een toename van de getijslag in station S, die evenredig is met de getijslag in Vlissingen op het nieuwe tijdstip.

Figuur 2.14 toont de beide bijdragen aan de getijslag in het decennium 2001/2010 uitgaande van de getijslag in het decennium 1911/1920<sup>4</sup>.



Figuur 2.14: Bijdragen aan de gemiddelde getijslag in 2001/2010 ten gevolge van de toename van de getijslag in Vlissingen (verschil blauwe en rode lijn) en ten gevolge van de toename van de amplificatie (verschil tussen groene en blauwe lijn) uitgaande van de gemiddelde getijslag in 1911/1920.

Uit Figuur 2.14 volgt, dat de toename van de getijslag in het estuarium ten gevolge van de toename van de getijslag in Vlissingen ondergeschikt is aan de toename van de getijslag die het gevolg is van een toename van de amplificatie.

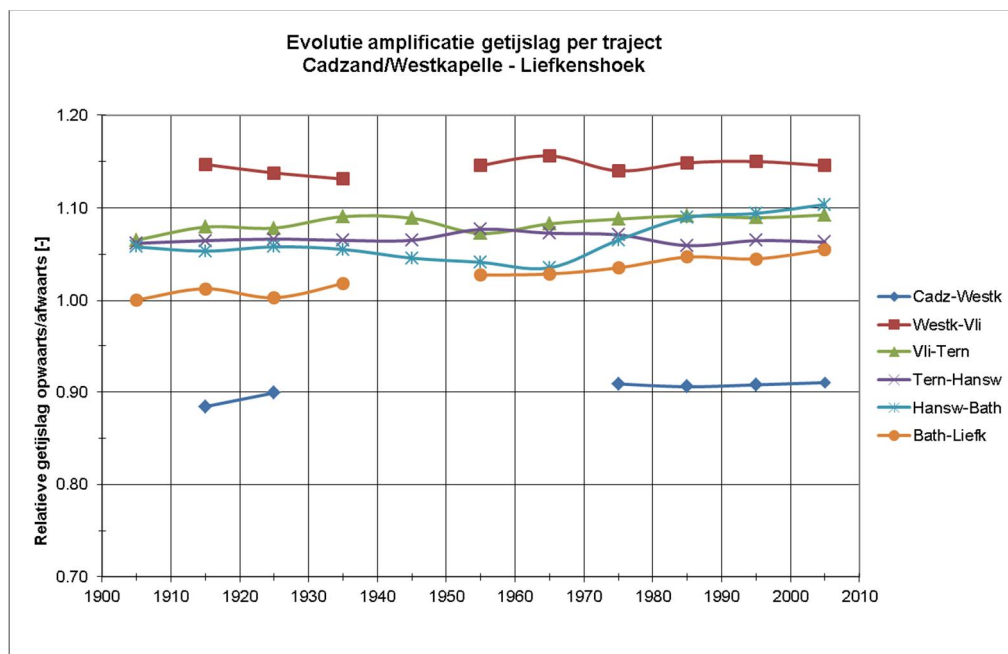
De veronderstelling, dat de amplificatie  $\alpha_{V-S}^0$  constant blijft als de getijslag in Vlissingen toeneemt, is een vereenvoudiging. Een toename van de getijslag resulteert namelijk in meer demping t.g.v. de grotere stroomsnelheden en dus toegenomen bodemwrijving (bij een onveranderlijke bodem). In dat geval zal de *amplificatie*  $\alpha_{V-S}^0$  iets afnemen al neemt de *getijslag* in station S wel toe t.g.v. de toename in de mond. De blauwe lijn in Figuur 2.14 komt dan iets lager te liggen. In Par. 3.4 (Figuur 3.29) wordt dit effect met het analytische model voor het traject Vlissingen-Antwerpen bepaald. Bij de huidige gemiddelde geuldiepte van bijna 13 m resulteert een toename van de getijslag van 5%, d.i. ongeveer de waargenomen toename gedurende de afgelopen 100 jaar, in een *afname* van de amplificatie van minder dan 0,01. De waargenomen *toename* van de amplificatie in Antwerpen gedurende deze

<sup>4</sup> De periode 1911/1920 is gekozen als referentie, omdat voor de periode 1901/1910 meer data ontbreken.

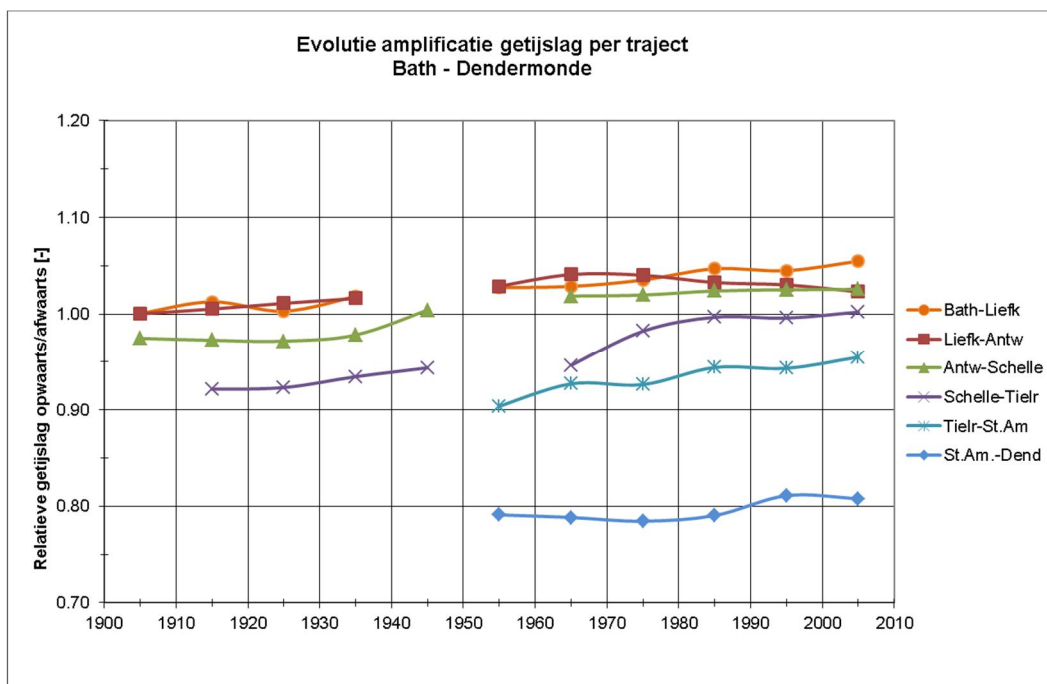
periode bedraagt 0,2. Effecten van veranderingen *in* het estuarium zijn dus ook in dit opzicht veel groter dan effecten van veranderende randcondities. Het is daarbij wel mogelijk dat de bodem zich zodanig aanpast dat de stroomsnelheden weer gelijk worden aan de oorspronkelijke situatie. De waterdiepte is dan toegenomen, waardoor de ruwheidsterm kleiner en de amplificatie groter worden. In dat geval is *in* het estuarium het effect van een veranderde randconditie merkbaar door een toegenomen waterdiepte; de blauwe lijn in Figuur 2.13 komt dan hoger te liggen.

De voorgaande figuren over de evolutie van de amplificatie laten zien dat er op de lange termijn sprake is van een toename. Om vast te stellen langs welk deel van het estuarium deze toename vooral optreedt, en wanneer, is de amplificatie tussen twee opeenvolgende stations bepaald. Figuren 2.15a-c geeft deze amplificatie, waarbij de 18,6-jaar variatie vooraf uit de tijdreeks is verwijderd:

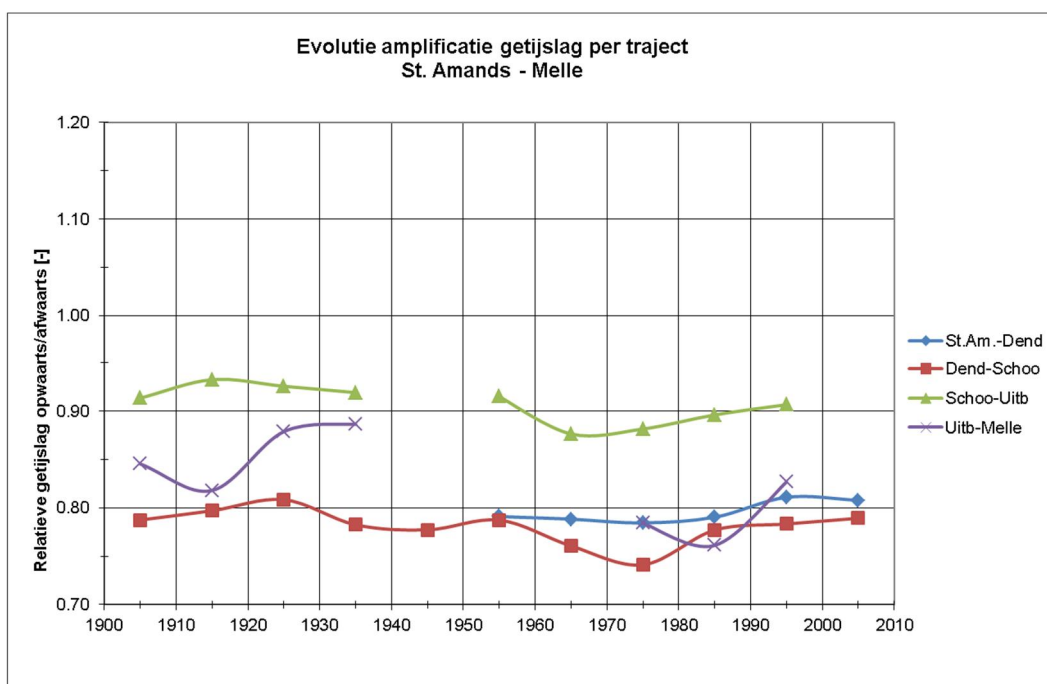
- Figuur 2.15a voor de opvolgende trajecten tussen Cadzand/Westkapelle en Bath/Liefkenshoek,
- Figuur 2.15b voor de opvolgende trajecten tussen Bath/Liefkenshoek en St. Amands/Dendermonde;
- Figuur 2.15c voor de opvolgende trajecten tussen St. Amands/Dendermonde en Uitbergen/Melle.



Figuur 2.15a: Evolutie amplificatie voor opeenvolgende trajecten tussen Cadzand/Westkapelle en Bath/Liefkenshoek.



Figuur 2.15b: Evolutie amplificatie voor opeenvolgende trajecten tussen Bath/Liefkenshoek en St. Amands/Dendermonde.



Figuur 2.15c: Evolutie amplificatie voor opeenvolgende trajecten tussen St. Amands/Dendermonde en Uitbergen/Melle.

De amplificatie in de Westerschelde tussen Westkapelle/Cadzand en Hansweert laat voor geen van de afzonderlijke trajecten een systematische toename zien. Tussen Hansweert en Bath neemt de amplificatie wel toe in de jaren zeventig tot aan ca 1990. Na 2000 is weer sprake van een toename. Voor 1970 is er (vanaf jaren '30) sprake geweest van een afname

van de amplificatie. Het traject Bath-Liefkenshoek laat eveneens een toename van de amplificatie zien, geleidelijker, en gedurende een langere periode (vanaf jaren '30 tot heden).

Op de Beneden-Zeeschelde, over het traject Liefkenshoek-Antwerpen, is de amplificatie eerst toegenomen (tussen ca 1910 en 1970) en vanaf ca 1980 weer licht gedaald. Tussen Antwerpen en Schelle is sprake van een toename (van ca. 1940 tot in de jaren '60 of eerder) met daarna een geringe toename, die lijkt te stabiliseren.

Op de Boven-Zeeschelde is zowel tussen Schelle en Tielrode als tussen Tielrode en St. Amands de amplificatie toegenomen. Voor het eerstgenoemde traject is deze toename opgetreden vanaf de jaren '30 tot ca 1950 (beperkt) en vooral in de jaren '70 en '80, waarna stabilisatie optreedt. Tussen Tielrode en St. Amands is sprake van trendmatige toename sinds de jaren '60, die nog steeds voortduurt. Bovenstrooms van St. Amands kan niet worden gesproken van een duidelijke toename van de amplificatie maar eerder van een (geringe) afname, vooral tussen Uitbergen en Melle. De variaties over de opvolgende decaden zijn wat groter dan elders in het estuarium.

De toename van de amplificatie van de getijslag is dus opgetreden voor elk van de trajecten tussen Hansweert en St. Amands met de grootste toename tussen Schelle en Tielrode (+0,08) en de kleinste toename tussen Liefkenshoek en Antwerpen (+0,02). Langs de overige trajecten tussen Hansweert en St. Amands is de amplificatie met ongeveer 0,05 toegenomen.

De resultaten zijn samengevat in Tabel 2.4.

*Tabel 2.4: Veranderingen amplificatie getijslag per decade en per traject: Hansweert-Bath (H-B), Bath-Liefkenshoek (B-L), Liefkenshoek-Antwerpen (L-A), Antwerpen-Schelle (A-S), Schelle-Tielrode (S-T) en Tielrode-St. Amands (T-Am). De netto veranderingen per traject voor tijdvak 1911-2010 zijn in de 2<sup>e</sup> kolom vermeld (afgerond) als som van de tijdvakken na 1911-1920.*

vermeld (afgerond) als som van de tijdvakken na 1911-1920:

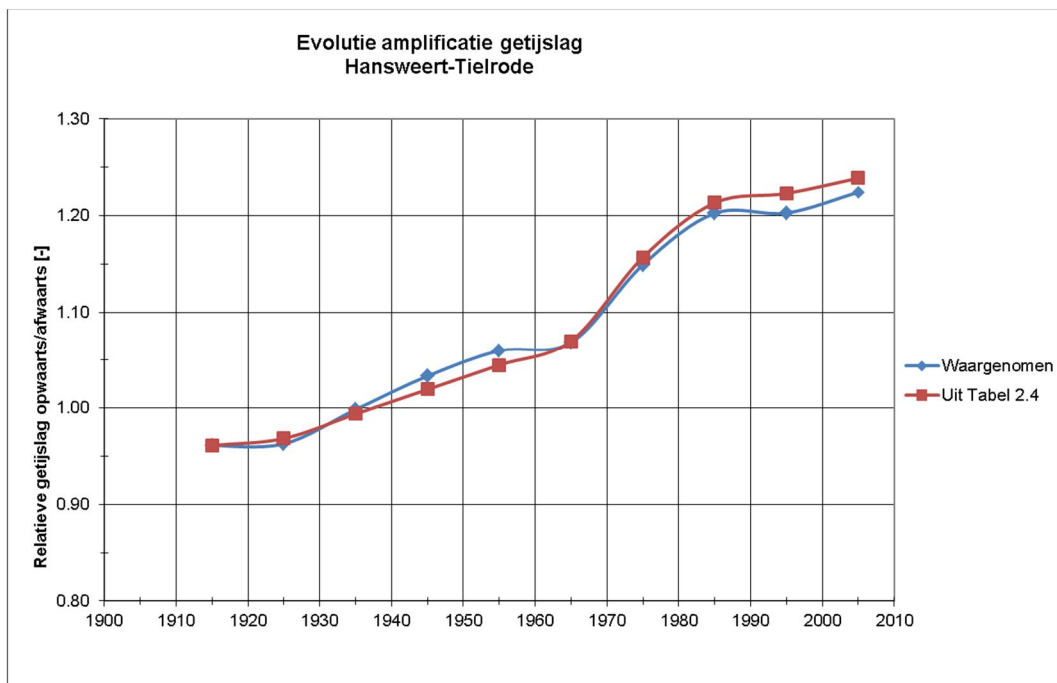
	1911-2010	1911-1920	1921-1930	1931-1940	1941-1950	1951-1960	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010
H-B	+0,05			-0,023				+0,055		+0,004	+0,010
B-L	+0,05			+0,052							
L-A	+0,02		+0,036						-0,015		
A-S	+0,05			+0,047				+0,007			
S-T	+0,08			+0,023				+0,051		+0,005	
T-Am	+0,05						+0,051				

Een toename van de amplificatie met 0,01 is equivalent met een toename van de getijslag met 0,05 m uitgaande van een "karakteristieke getijslag" van 5 m tussen Hansweert en Tielrode. De totale toename van de amplificatie over dit traject bedraagt 0,25 wat correspondeert met de waargenomen toename van de getijslag van 1,2 m in Tielrode t.o.v. Hansweert (en dus ook t.o.v. Vlissingen, omdat in de Westerschelde afwaarts van Hansweert vrijwel geen toename van de amplificatie is opgetreden).

Figuur 2.16 toont voor de 10-jarige perioden tussen 1901/1910 en 2001/2010 de amplificatie in Tielrode t.o.v. Hansweert als totaal resultaat van de afzonderlijke bijdragen zoals genoemd in Tabel 2.4 (rode lijn). Ook is de amplificatie vermeld, welke direct volgt uit de waargenomen getijslag in Hansweert en Tielrode. De kleine verschillen komen voort uit het feit dat in Tabel 2.4 alleen de belangrijkste veranderingen zijn vermeld. Ook zijn de vermelde waarden in de tabel voor de veranderingen van de amplificatie in Figuur 2.16 lineair geïnterpoleerd naar tussenliggende decaden. Uit de figuur volgt dat de amplificatie tussen Hansweert en Tielrode



gedurende twee perioden is toegenomen: vanaf jaren '20 tot in de jaren 50, met een toename van 0,10 en vanaf ca 1970 tot ca 1990, met een toename van 0,15.



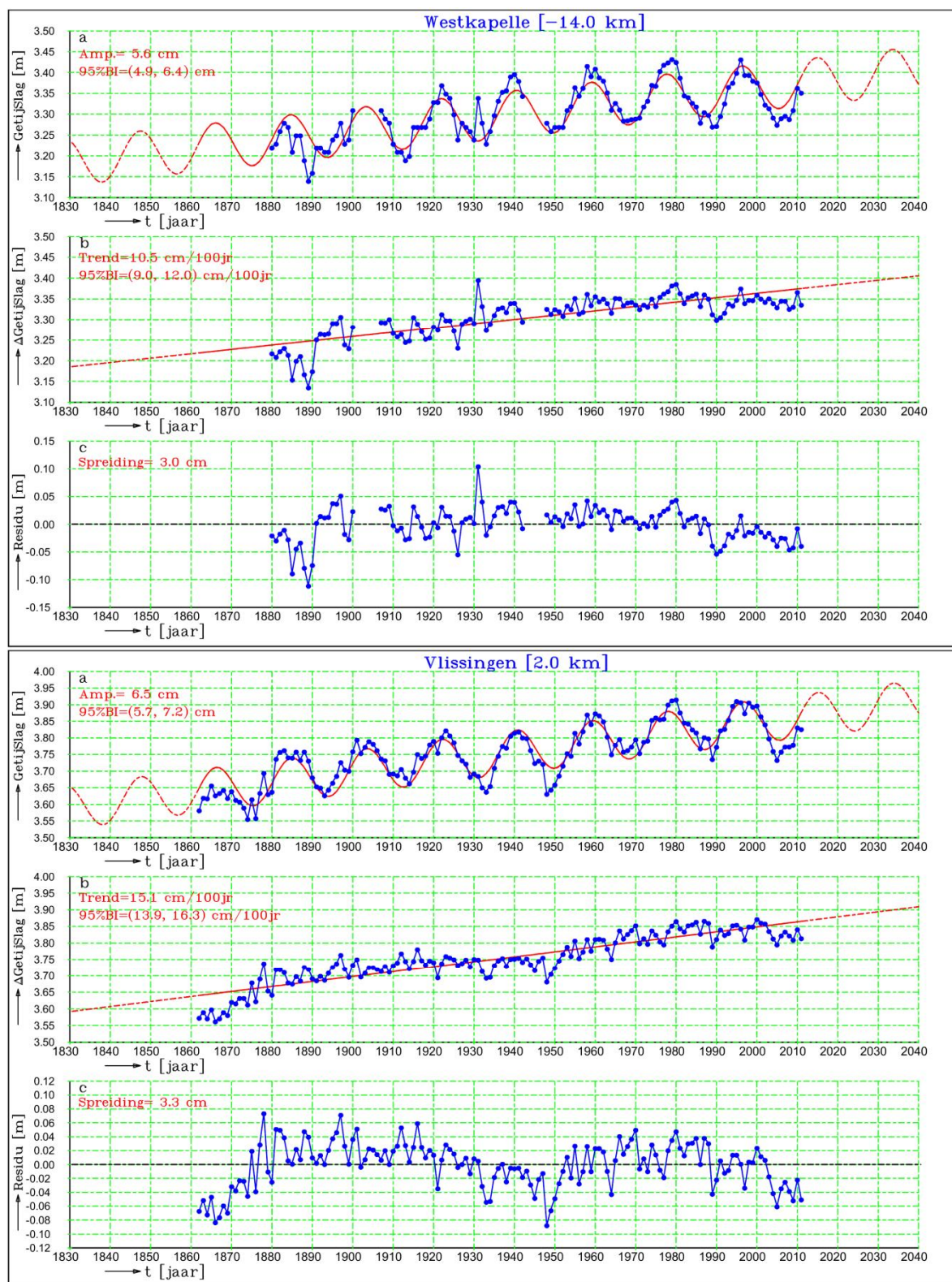
Figuur 2.16: Amplificatie getijslag Hansweert-Tielrode

## 2.5 Trends en 18,6 jaar variatie in de evolutie van de getijslag<sup>5</sup>

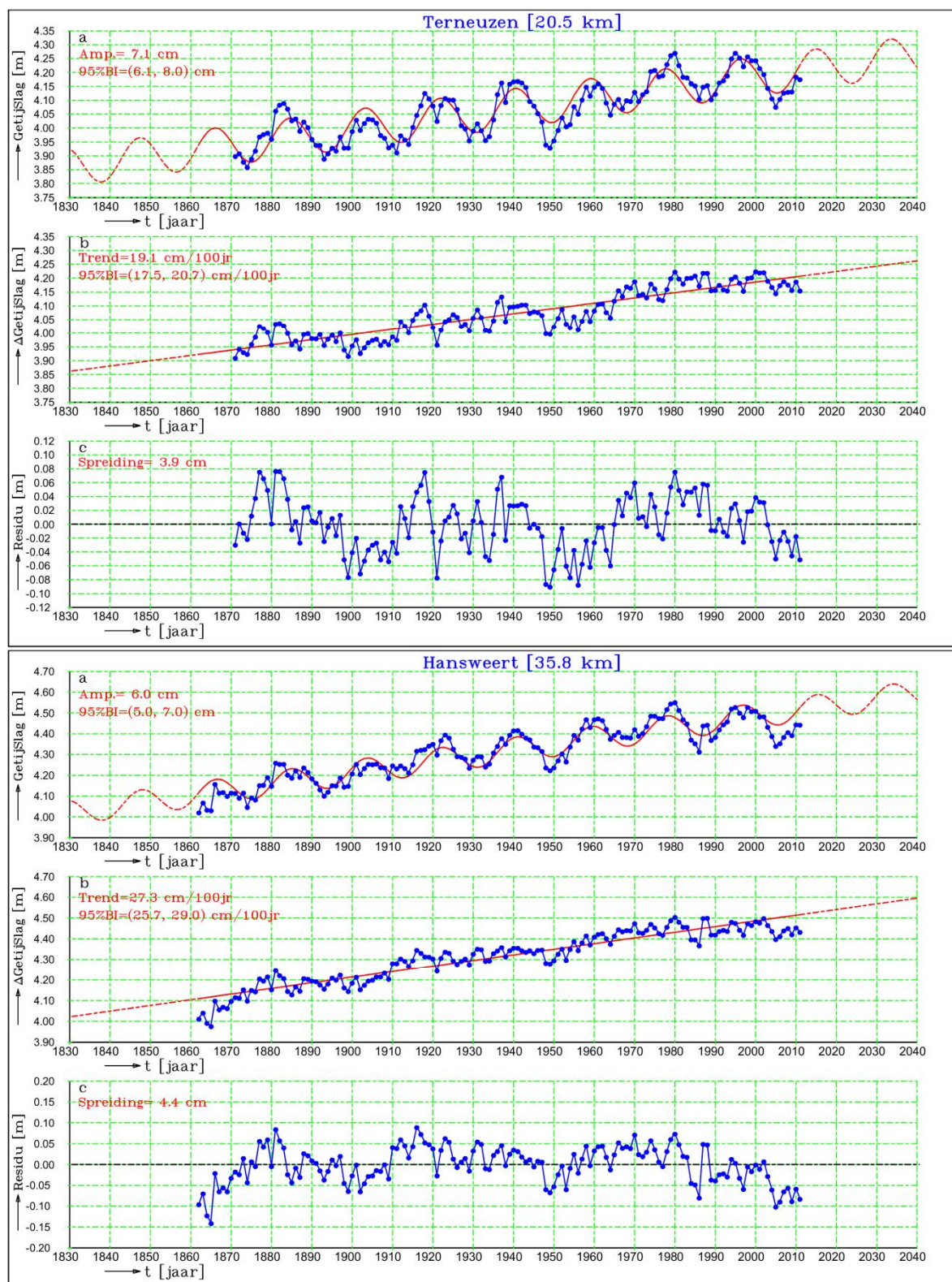
Met een statistisch model zijn de trends en 18,6-jaar variatie van de getijslag bepaald, d.i. inclusief hun 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Met dit model is de 18,6-jaar variatie in de oorspronkelijke signalen voor de getijslag in de meetstations verwijderd (zie Par. 2.4). De Figuren 2.17a t/m 2.17o geven per station:

- Bovenste venster: de waargenomen jaargemiddelde getijslag (blauwe lijn met symbolen) en het door het statistische model bepaalde verloop, zijnde een lineaire trend en de 18,6-jaar variatie (rode lijn);
- Middelste venster: de waargenomen getijslag na verwijdering van de 18,6-jaar variatie (blauwe lijn met symbolen) en de lineaire trend (rode lijn);
- Onderste venster: het residu, zijnde het verschil tussen enerzijds de waargenomen getijslag en anderzijds het totaal van de lineaire trend en de 18,6-jaar variatie (ofwel het verschil tussen de blauwe en de rode lijn in het middelste venster). Dit betreft dus dat deel van het signaal dat niet door een lineaire trend en een harmonische met een periode van 18,6 jaar wordt beschreven.

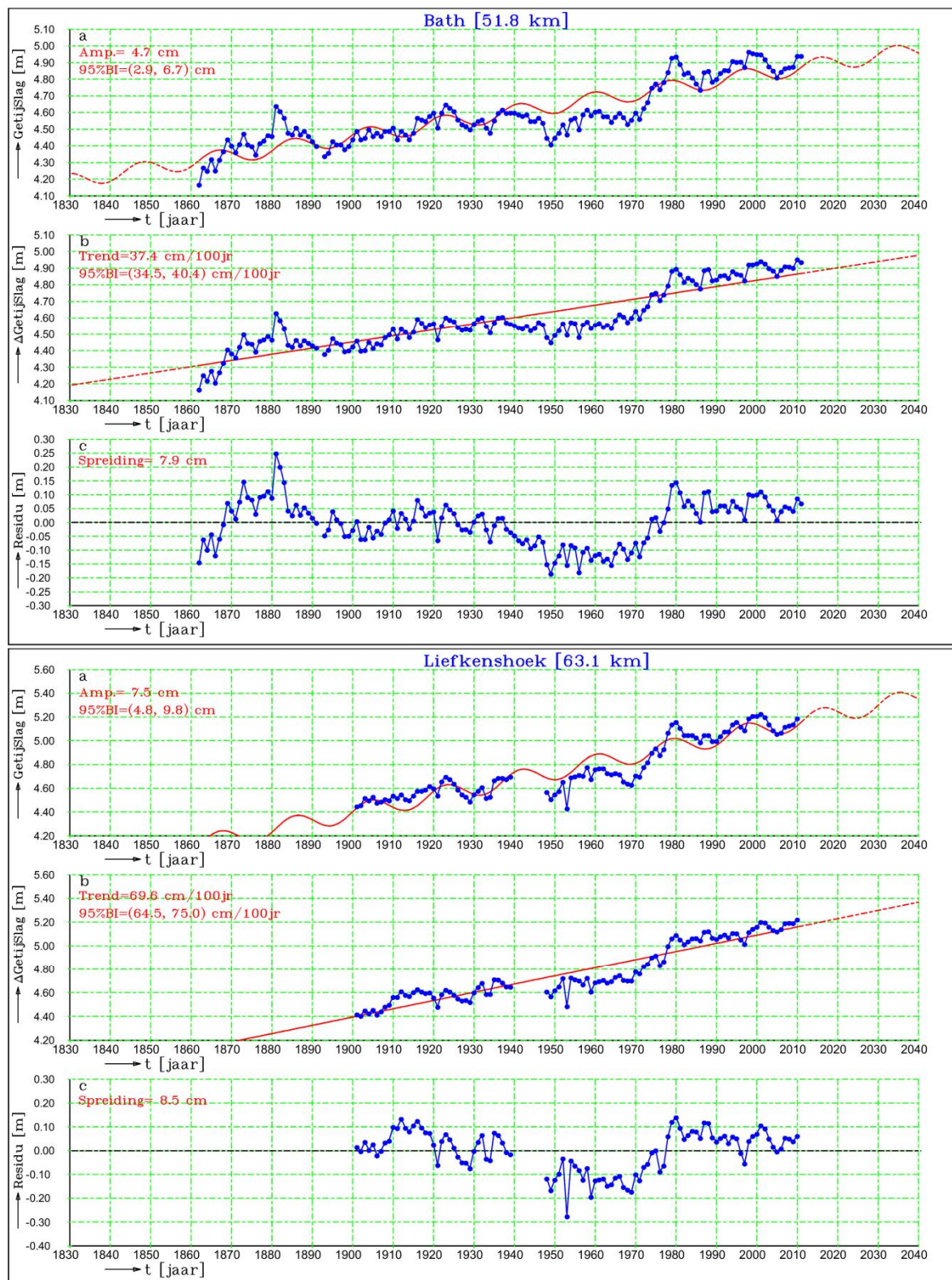
<sup>5</sup> De ontwikkeling van en de berekeningen met het statistische model zijn uitgevoerd door dr. H.F.P.M. van den Boogaard van Deltares.



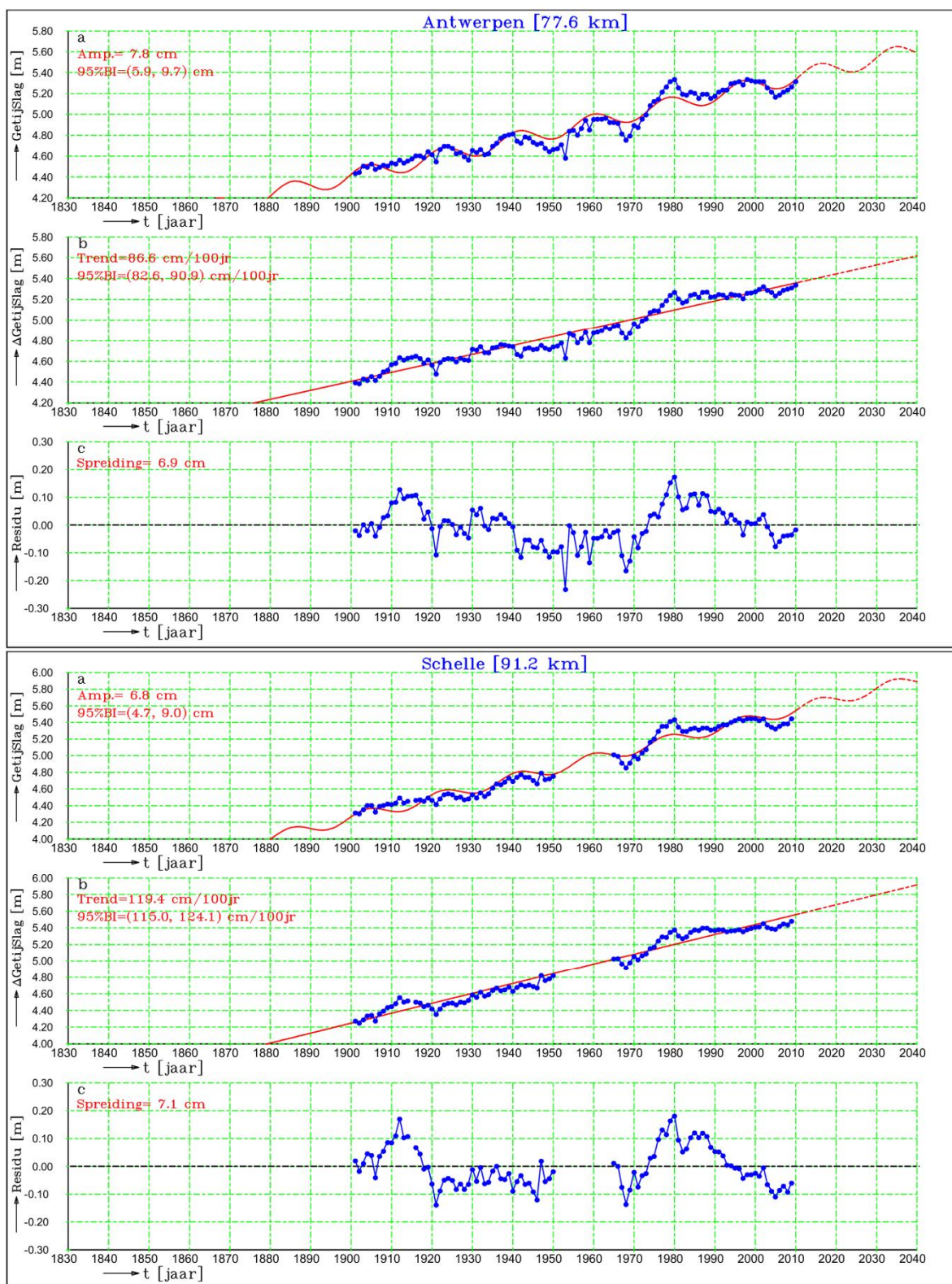


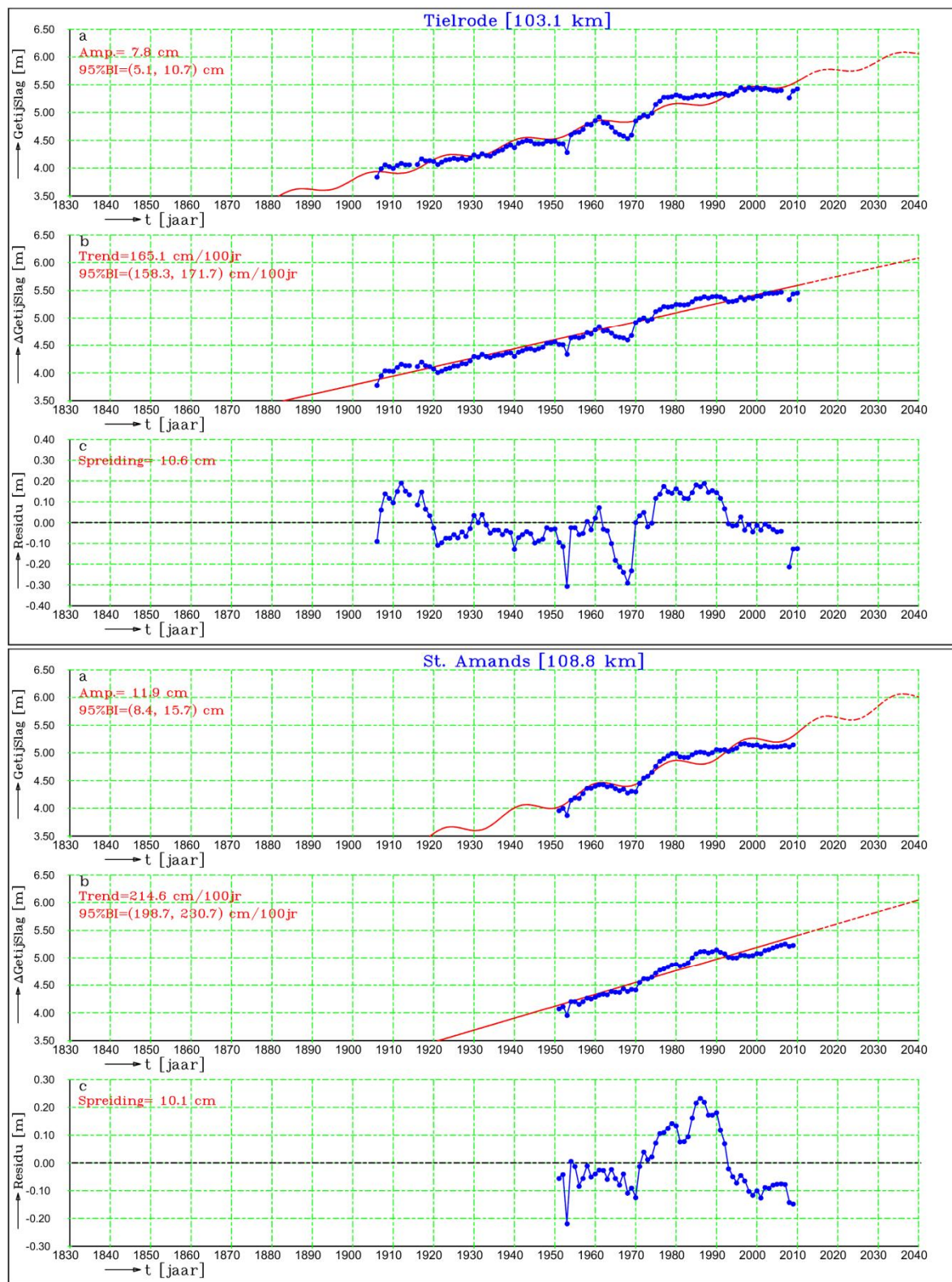




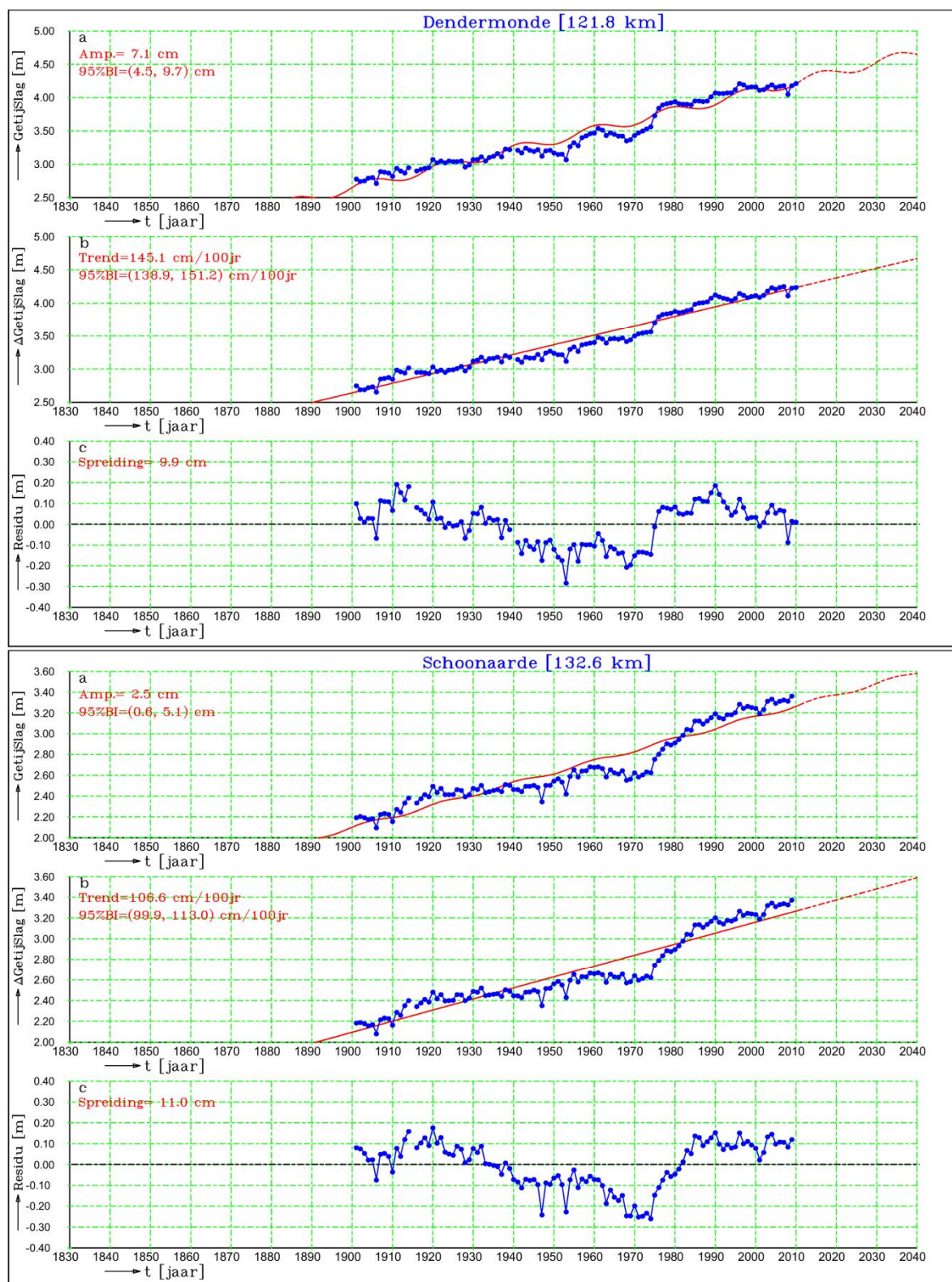




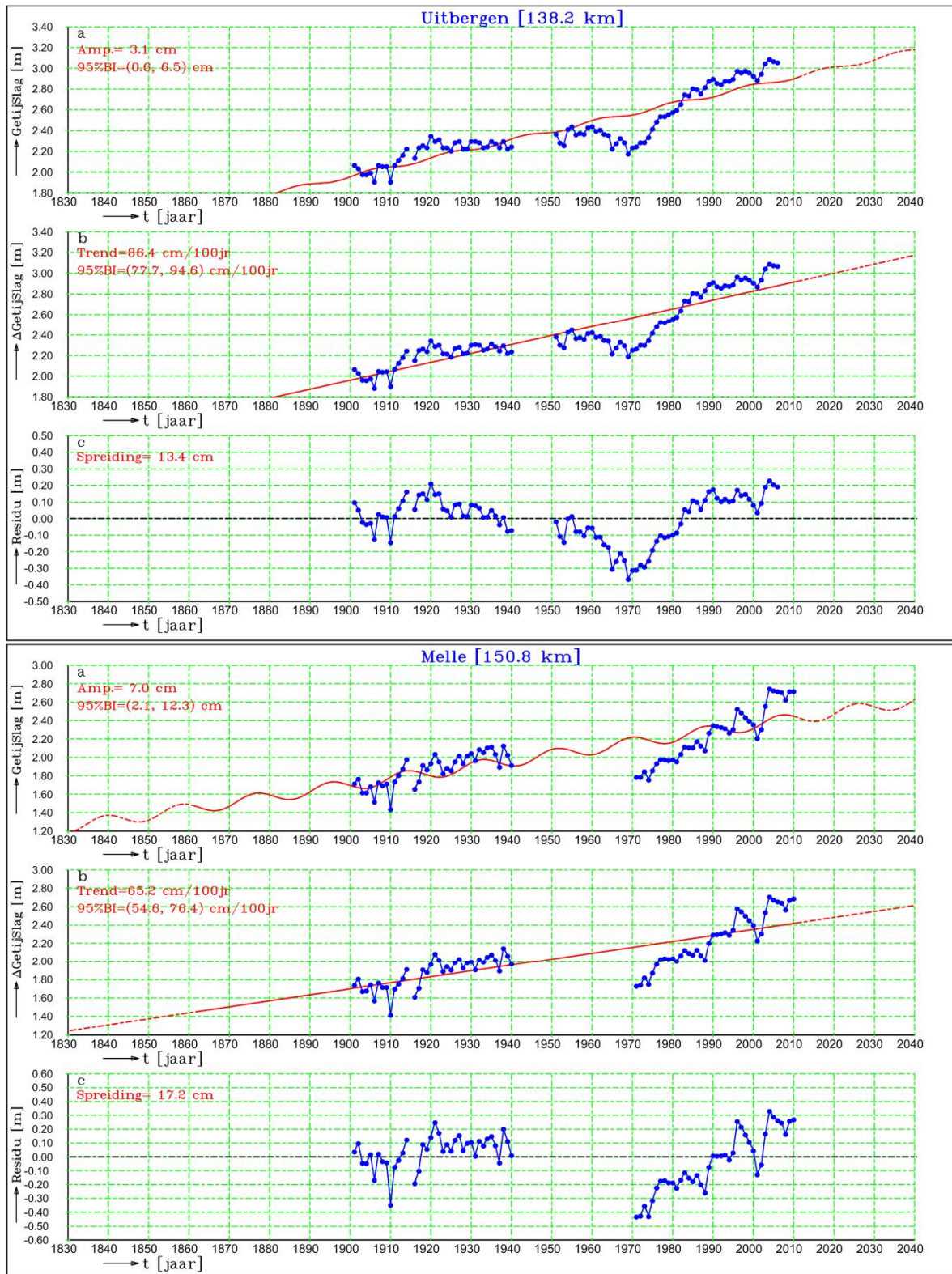












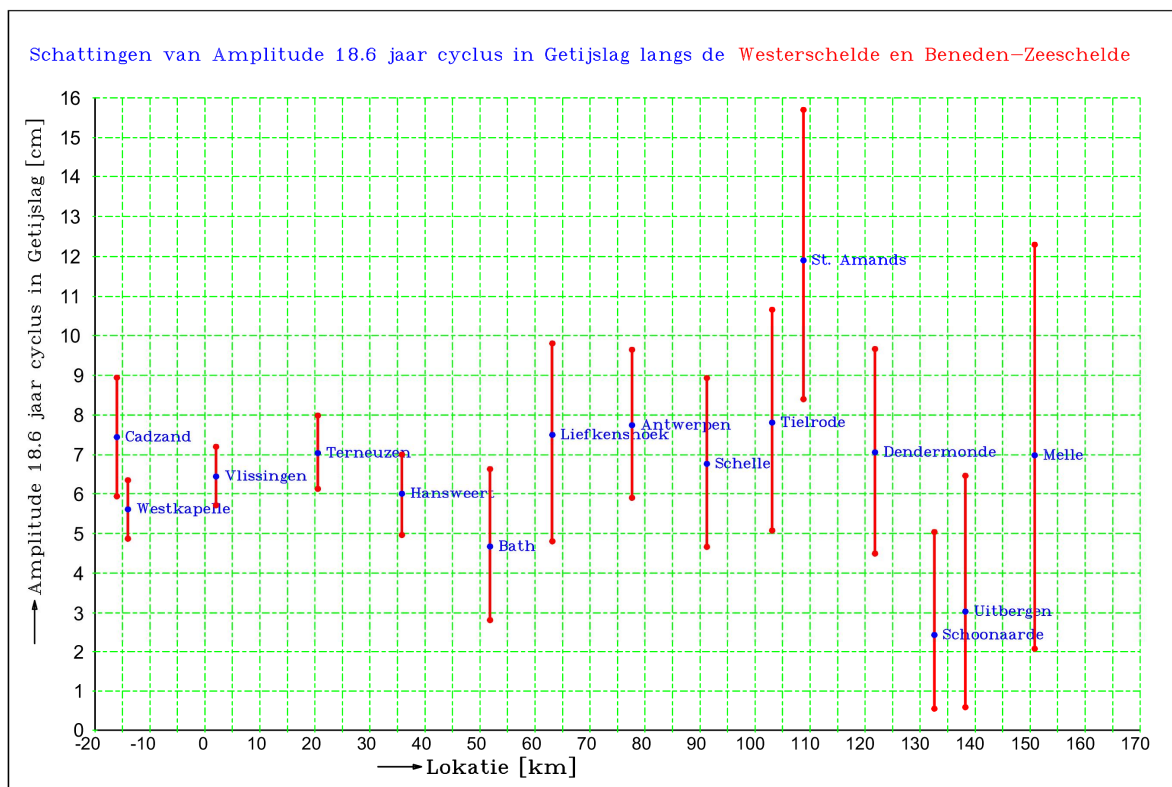
Figuur 2.17a t/m o: Bovenste venster: waargenomen getijslag (blauwe lijn met symbolen) en door het statistische model bepaalde verloop als resultaat van een lineaire trend en de 18,6-jaar variatie (rode lijn). Middelste venster: waargenomen getijslag na verwijdering van de 18,6-jaar variatie (blauwe lijn met symbolen) en lineaire trend (rode lijn). Onderste venster: residu van de getijslag na verwijdering van de lineaire trend en de 18,6-jaar variatie.



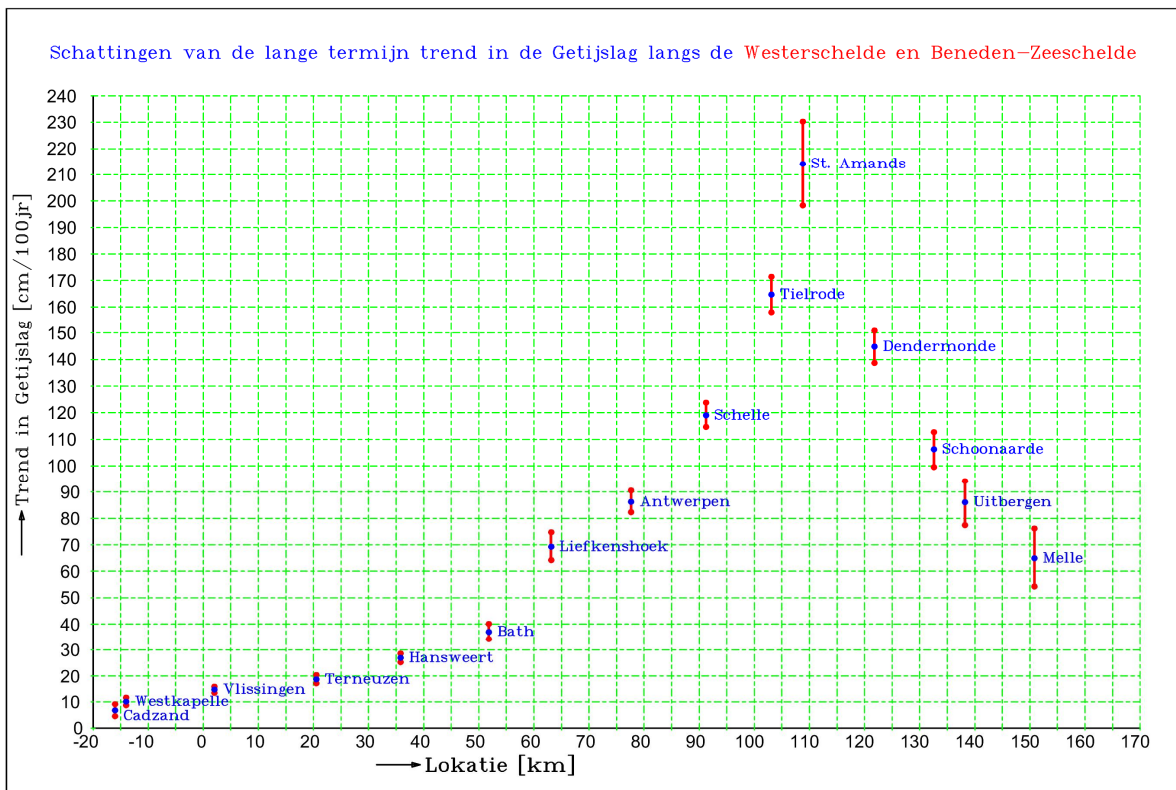
In de figuren zijn tevens vermeld: (i) de amplitude van de 18,6-jaar variatie en het 95%-betrouwbaarheidsinterval (bovenste venster), (ii) de lineaire trend als gemiddelde toename van de getijslag per 100 jaar en 95%-betrouwbaarheidsinterval (middelste venster) en (iii) de spreiding van het residu. In de figuren 2.18a t/m 2.18c zijn deze kentallen als functie van de plaats langs het estuarium weergegeven:

- De amplitude van de 18,6-jaar variatie;
- De grootte van de lineaire trend;
- De spreiding van het residu.

Uit Figuur 2.18a volgt, dat de 18,6-jaar amplitude in de meeste locaties gemiddeld 6-8 cm bedraagt. De onzekerheid (betrouwbaarheidsinterval) neemt toe in opwaartse richting. In Bath (gemiddeld 5 cm) en vooral Schoonaarde en Uitbergen (gemiddeld 2-3 cm) is de amplitude relatief klein en in St. Amands relatief groot (gemiddeld 12 cm). Voor St. Amands geldt, dat de waarnemingsreeks relatief kort is en daardoor de onzekerheid groot.

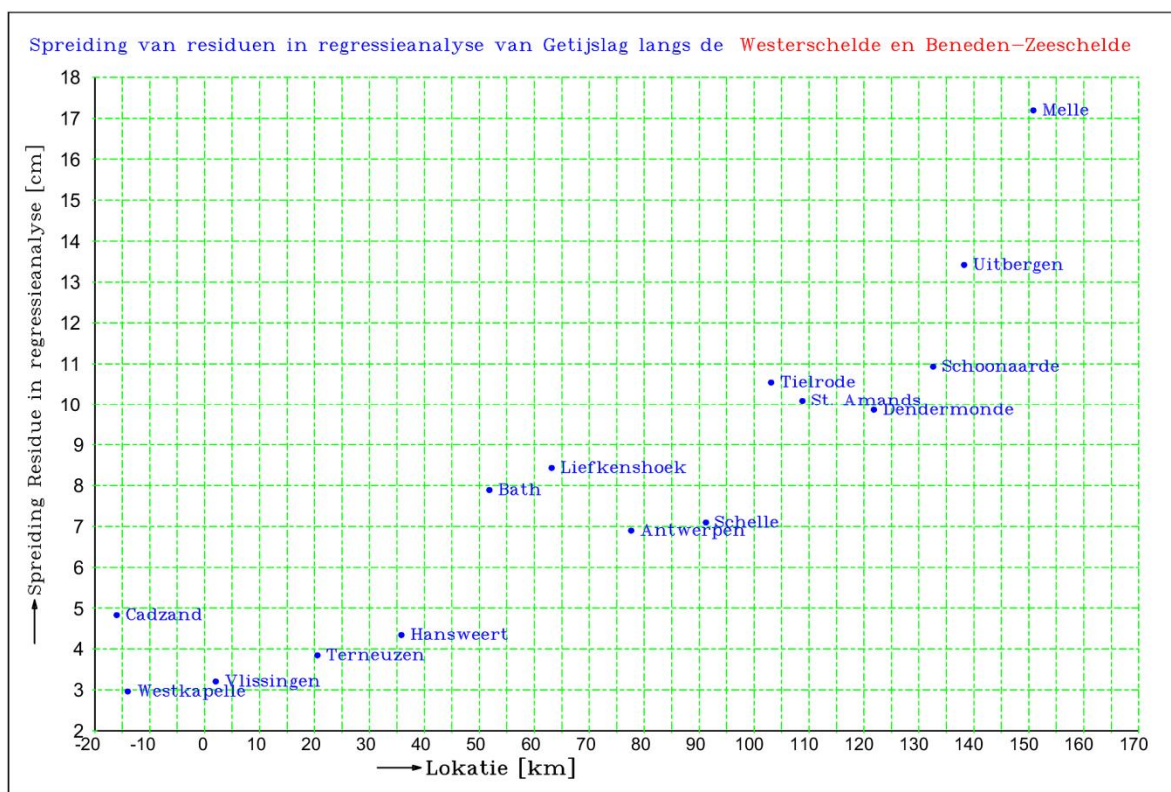


Figuur 2.18a: Geschatte amplitude van de 18,6-jaar variatie langs het estuarium.



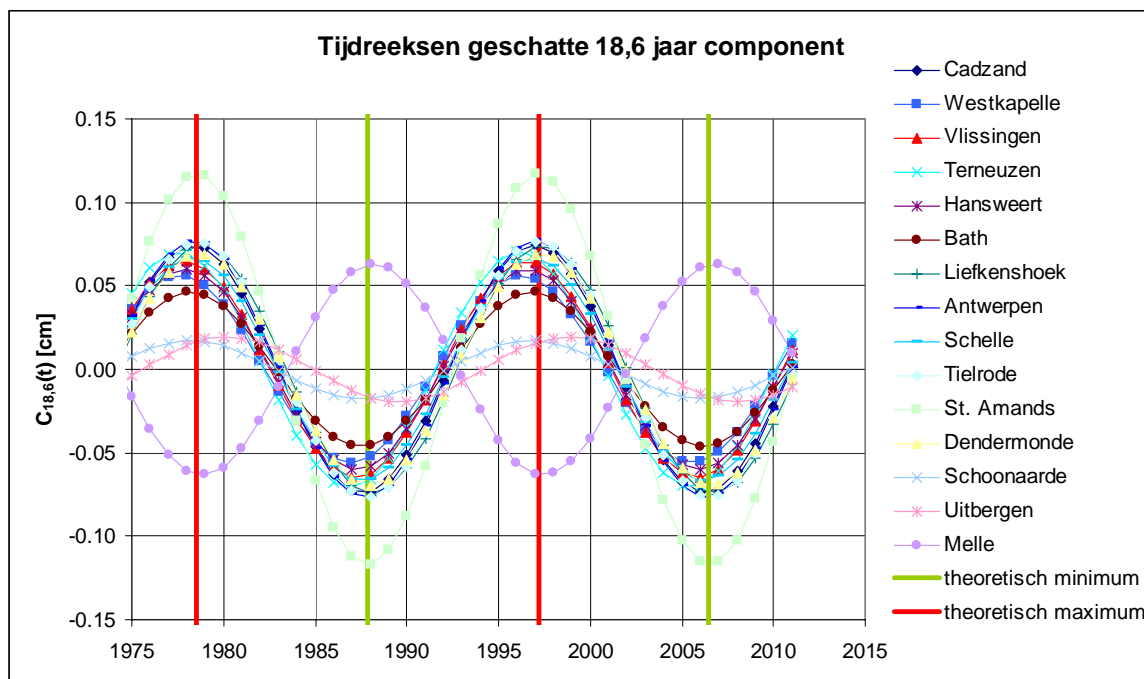
Figuur 2.18b: Lineaire trend van de getijslag (per 100 jaar).

De grootte van de lineaire trend in de jaargemiddelde getijslag (Figuur 2.18b) neemt vanaf de benedenstroomse rand (Westkapelle-Cadzand) in opwaartse richting tot St. Amands sterk toe (helling van de regressielijn is een factor 20 groter dan die in de mond). Vanaf St. Amands neemt de grootte van de lineaire trend van de getijslag weer af maar de toename per 100 jaar blijft groter dan die in de Westerschelde. Wel neemt de onzekerheid in de uitgevoerde regressieanalyse in opwaartse richting toe, zoals in Figuur 2.18c wordt getoond door de spreiding in de residuen.



Figuur 2.18c: Spreiding van de residuen in de regressieanalyse van de getijslag.

De met het statistische model bepaalde 18,6 jaar variatie is voor alle meetstations weergegeven in Figuur 2.19. De figuur laat zien, dat in de meeste stations de 18,6 jaar variatie in fase is, d.w.z. de maxima (en minima) van de getijslag treden, zoals verwacht, in dezelfde jaren op. In de stations Uitbergen en vooral Melle zijn de onzekerheden kennelijk zo groot, dat de variatie in deze stations niet meer synchroon verloopt met die in de overige stations. Met de groene en rode verticale lijnen is weergegeven in welke jaren theoretisch minima (november 1987 en juni 2006) en maxima (juli 1978 en maart 1997) zouden moeten optreden, zie bv. Houston en Dean (2011). Voor de geanalyseerde meetreeksen in de meeste stations is dit inderdaad het geval.



Figuur 2.19: 18,6 jaar variatie in de meetstations langs het Schelde-estuarium zoals bepaald met het statistische model.

## 2.6 Samenvatting

De evolutie van de getij karakteristieken hoogwater, laagwater en getijslag sinds 1901 zijn geanalyseerd voor alle (beschikbare) meetstations langs het Schelde estuarium tussen Westkapelle en Melle. Hierbij zijn eerst jaargemiddelde waarden gemiddeld over opeenvolgende tijdvakken van 10 jaar. Deze zijn representatief voor de gemiddeld opgetreden toestand van het systeem gedurende deze tijdvakken. Dit houdt in dat de waarden voor de getij karakteristieken mede worden bepaald door de trendmatige toename van de getijslag en door de getijcomponent met een periode van 18,6 jaar.

Op de tijdschaal van ruim 100 jaar zijn de hoogwaters in het estuarium gestegen, de laagwaters in het westelijk deel (globaal Westerschelde) eveneens gestegen en in de Zeeschelde gedaald. De getijslag is in het gehele estuarium toegenomen, vooral in het deel oostelijk van Hansweert/Bath.

Omdat de resultaten mede bepaald worden door de 18,6 jaar variatie zijn de getij karakteristieken eveneens gemiddeld voor opeenvolgende perioden van 19 jaar. De invloed van de 18,6 jaar variatie wordt hiermee voor een belangrijk deel weg gefilterd. Het hiervoor geschetste beeld van de verandering van de getij karakteristieken over een tijdschaal van ruim 100 jaar verandert hierdoor niet, d.w.z. een stijging van de hoogwaters in het gehele estuarium, een stijging van de laagwaters afwaarts van Bath en een daling van de laagwaters in de Zeeschelde vanaf Antwerpen. De getijslag toont een toename in het gehele estuarium en vooral in de Zeeschelde. Indien de twee laatste 19-jarige perioden worden vergeleken (1973-1991 en 1992-2010) volgt, dat het hoogwater gedurende de laatste periode is toegenomen in het gehele estuarium en het laagwater afwaarts van Bath is gestegen en opwaarts van Tielrode is gedaald. De getijslag in de Westerschelde afwaarts van Hansweert is gelijk gebleven en opwaarts hiervan toegenomen.

De resultaten van de analyse voor de laatste 10-jarige en 19-jarige tijdvakken zijn samengevat in Tabel 2.4.

*Tabel 2.4: Veranderingen hoogwater, laagwater en getijslag gedurende laatste tijdvak van 10 jaar t.o.v. voorafgaand tijdvak en laatste tijdvak van 19 jaar t.o.v. voorafgaand tijdvak.*

*+: verhoging laag- en hoogwater en toename getijslag.*

*-: verlaging laag- en hoogwater en afname getijslag.*

<b>Tijdvak</b>	<b>Hoogwater</b>	<b>Laagwater</b>	<b>Getijslag</b>
2001-2010 t.o.v. 1991-2000	= gehele estuarium (+ in Melle)	+ afwaarts Tielrode = opwaarts Tielrode (- in Melle)	- afwaarts Bath = opwaarts Bath (+ in Melle)
1992-2010 t.o.v. 1973-1991	+ gehele estuarium	+ afwaarts Bath - opwaarts Tielrode	= afwaarts Hansweert + opwaarts Hansweert

De hierboven geschetste ontwikkelingen laten zich moeilijk onderling vergeleken, omdat de perioden anders zijn. De 19-jarige perioden bestrijken een langere tijdspanne van de evolutie in het estuarium terwijl het effect van de 18,6 jaar periode wordt uitgemiddeld. Indien de 18,6 variatie op voorhand wordt verwijderd, dan blijkt dat de getijslag afwaarts van Hansweert gedurende de laatste decade (2001-2010) gelijk is gebleven aan de getijslag tijdens de voorafgaande decade (1991-2010). De getijslag opwaarts van Hansweert is echter toegenomen. De 18,6 jaar variatie maskeert in dit geval de trendmatige toename van de getijslag in het estuarium.

De toename van de getijslag sinds 1901 verloopt sneller gaande van de mond in opwaartse richting. In St. Amands verloopt deze evolutie het snelst (gemiddeld 2 cm/jaar) maar de waarnemingsreeks in dit station is relatief kort (vanaf 1951). De gemiddelde toename per jaar in Tielrode is 16 keer groter dan in Westkapelle en 11 keer groter dan in Vlissingen.

De amplitude van de 18,6 jaar variatie in het estuarium bedraagt gemiddeld 6-8 cm met kleinere waarden in Bath (gem. 5 cm) en in Schoonaarde en Uitbergen (gem. 2-3 cm) en een grotere waarde in St. Amands (gem. 12 cm). De 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor de schattingen hiervan nemen toe in opwaartse richting.

## 2.7 Conclusies

1. Voor een beoordeling van de evolutie van gemiddelde getijslag per decade dient eerst de 18,6-jaar component in het astronomische getij verwijderd te worden. Dit kan door een statische bewerking of door naar de amplificatie ten opzichte van het station Vlissingen te kijken (zie 2). Na verwijdering hiervan blijkt de getijslag tijdens het laatste decennium (2001-2010) t.o.v. het voorafgaande decennium (1991-2000) toegenomen te zijn opwaarts van Hansweert: 5- 10 cm in de Beneden-Zeeschelde en 10-15 cm in de Boven-Zeeschelde.
2. De toename van de getijslag in het estuarium wordt veroorzaakt door een samenspel van de toename op zee, zoals gemeten in Vlissingen, en de toename ten gevolge van veranderingen in het estuarium zelf. De 'externe' oorzaken kunnen worden gescheiden van de 'interne' door de getijslag in een station te bepalen t.o.v. de getijslag in Vlissingen (amplificatie). Een dergelijke beschouwing laat zien, dat de amplificatie in het estuarium opwaarts van Hansweert sinds 1901 is toegenomen.
3. De toename van de getijslag in het estuarium die het gevolg is van veranderingen op zee en de toename van de getijslag zoals die intern wordt veroorzaakt worden getoond in Figuur 2.14. De veranderingen ten gevolge van de toename van de getijslag op zee blijken veel kleiner dan ten gevolge van de toename van de amplificatie.
4. De toename van de amplificatie in het estuarium heeft plaatsgevonden tussen Hansweert en St. Amands, voor alle trajecten tussen die watermeetstations. Typische veranderingen *per traject* sinds het begin van de 20<sup>e</sup> eeuw zijn +0,05 % ofwel een toename van de getijslag per traject van 20-25 cm.
5. Ook gedurende het laatste decennium (2001-2010) is sprake geweest van een toename van de getijslag t.o.v. het voorafgaande decennium. Mogelijke oorzaken zijn (i) een grotere diepte van de geulen en (ii) een vermindering van het bergend oppervlak. De toename tijdens het laatste decennium heeft vooral plaatsgevonden tussen Hansweert en Bath, Bath en Liefkenshoek en Tielrode en St. Amands (elk traject een toename van ongeveer 0,01 ofwel een toename van de getijslag in St. Amands t.o.v. Hansweert van orde 15 cm).

### 3 Toepassing analytisch model op de Beneden-Zeeschelde

#### 3.1 Inleiding

In LTV V&T-rapport G-5 is voor de Westerschelde de evolutie van de getijkarakteristieken geanalyseerd in samenhang met de bodemkarakteristieken. Hiervoor is gebruik gemaakt van het analytische model voor getijvoortplanting van Van Rijn (2011).

In LTV V&T-rapport G-6 is de ontwikkeling van getij en bathymetrie voor de Beneden-Zeeschelde beschreven. Op basis van de daar gepresenteerde en toegeleverde gegevens wordt het analytische model in dit hoofdstuk eveneens toegepast op de trajecten Bath-Liefkenshoek, Liefkenshoek-Antwerpen en Antwerpen-Schelle.

Het analytische model van Van Rijn beschrijft de getijvoortplanting in een convergerend estuarium, waarbij de diepte constant wordt verondersteld en de breedte, en daarmee het stroomvoerend oppervlak, exponentieel afneemt in opwaartse richting. Met dit exponentiële verloop kan de grootschalige geometrie van het Schelde-estuarium goed worden beschreven. In LTV V&T-rapport G-5 is het estuarium in trajecten onderverdeeld, die worden begrensd door de waterstandstations (Vlissingen, Terneuzen, Hansweert en Bath). Elk traject is afzonderlijk gekalibreerd en onafhankelijk van de overige trajecten beschouwd. Deze aanpak vormt een sterke schematisatie van de werkelijkheid, omdat het estuarium bovenstrooms van het beschouwde traject ook van invloed is op de getijkarakteristieken meer benedenstrooms. Bij de kalibratie van het model is per traject gezocht naar een instelling van de ruwheid en de convergentielengte, waarbij de getijvoortplanting per traject zo goed mogelijk kon worden beschreven. Hierbij is gebleken dat de convergentielengte en de ruwheid per traject wat kan verschillen. Ter plaatse van de begrenzingen van de trajecten treden dan reflecties op, die niet door de modelvergelijkingen worden beschreven. Een vergelijking van de modelresultaten met de waarnemingen zal de toepasbaarheid van het model dan aan moeten geven. Evenzo geldt dat het effect van een gesloten einde (volledige reflectie) niet door het model wordt beschreven.

In Par. 3.2 worden eerst de resultaten getoond die eerder zijn verkregen voor de Westerschelde. Par. 3.3 geeft nieuwe resultaten voor drie trajecten langs de Beneden-Zeeschelde: Bath-Liefkenshoek, Liefkenshoek-Antwerpen en Antwerpen-Schelle. In Par. 3.4 is het analytische model toegepast op het traject Vlissingen-Antwerpen met slechts één convergentielengte en één ruwheidswaarde. Hierbij is eerst een vergelijking gemaakt met waarnemingen. Vervolgens is het effect van een grotere getijslag in Vlissingen op de amplificatie bepaald. Het analytische model mag, vanwege de onderliggende aannamen, alleen toegepast worden wanneer het gehele estuarium wordt geschematiseerd met slechts één waarde voor elk van de modelparameters (convergentielengte, ruwheid, geuldiepte en relatieve berging). In Par. 3.5 wordt dit gedaan voor de Schelde opwaarts van Hansweert. De verkregen resultaten worden vergeleken met de resultaten van Par. 3.2 voor het traject Hansweert-Bath. De conclusies van dit hoofdstuk zijn vermeld in Par. 3.6.



### 3.2 Westerschelde: eerder verkregen resultaten

Het model is toegepast voor de trajecten Vlissingen-Terneuzen, Terneuzen-Hansweert en Hansweert-Bath. De ruwheid is zoveel mogelijk gekozen in overeenstemming met wat gebruikt wordt voor de grote numerieke modellen voor het Schelde estuarium. Omdat energieverliezen ten gevolge van bijvoorbeeld neren door de numerieke modellen expliciet worden gemodelleerd zal de bodemruwheid in deze modellen kleiner zijn dan in het analytische model. De convergentielengte is gebaseerd op de dwarsdoorsneden in opeenvolgende raaien van een Delft3D-schematisatie van de bodem in 1998. Het betreft het totaal van de dwarsdoorsneden van de eb- en vloedgeulen. De Nikuradse-ruwheid ( $k$ -waarde) en de convergentielengte zijn voor de opvolgende jaren niet veranderd. De getijkarakteristieken hebben betrekking op (i) de M2-amplitude (feitelijk 2\*M2-amplitude als benadering voor de getijslag) en (ii) de voortplantingssnelheid, welke volgt uit het M2-faseverschil tussen het opwaartse en afwaartse station en de afstand tussen beide stations.

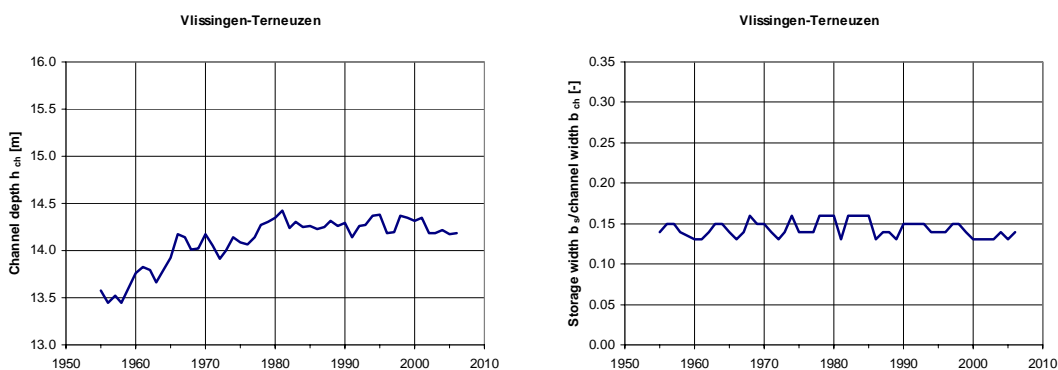
#### Vlissingen-Terneuzen

De invoergegevens voor het model zijn vermeld in Tabel 3.1.

Tabel 3.1: Invoer voor het analytische model voor de sectie Vlissingen-Terneuzen.

Invoer voor het model		
Getijperiode	T	45000 s
Nikuradse ruwheid	k	0,10 m
Convergentie lengte	$L_a$	39000 m
Sectie lengte	L	19500 m
Afgeleide grootheden		
Chézy ruwheid	C	$58 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ ( $h_{ch} = 14 \text{ m}$ )
Manning ruwheid	n	$0,027 \text{ s/m}^{1/3}$

De geuldiepte  $h_{ch}$  en de verhouding tussen de bergende breedte van het intergetijdengebied  $\Delta b$  en de geulbreedte  $b_{ch}$  zijn weergegeven in Figuur 3.1 voor de periode 1955-2008. Deze waarden vormen de invoer van het model en zijn gebaseerd op gemeten bodems. De waargenomen getijkarakteristieken in het afwaartse station worden gebruikt als randvoorwaarde voor het model en de karakteristieken in het opwaartse station worden vervolgens door het model uitgerekend en vergeleken met de waarnemingen.

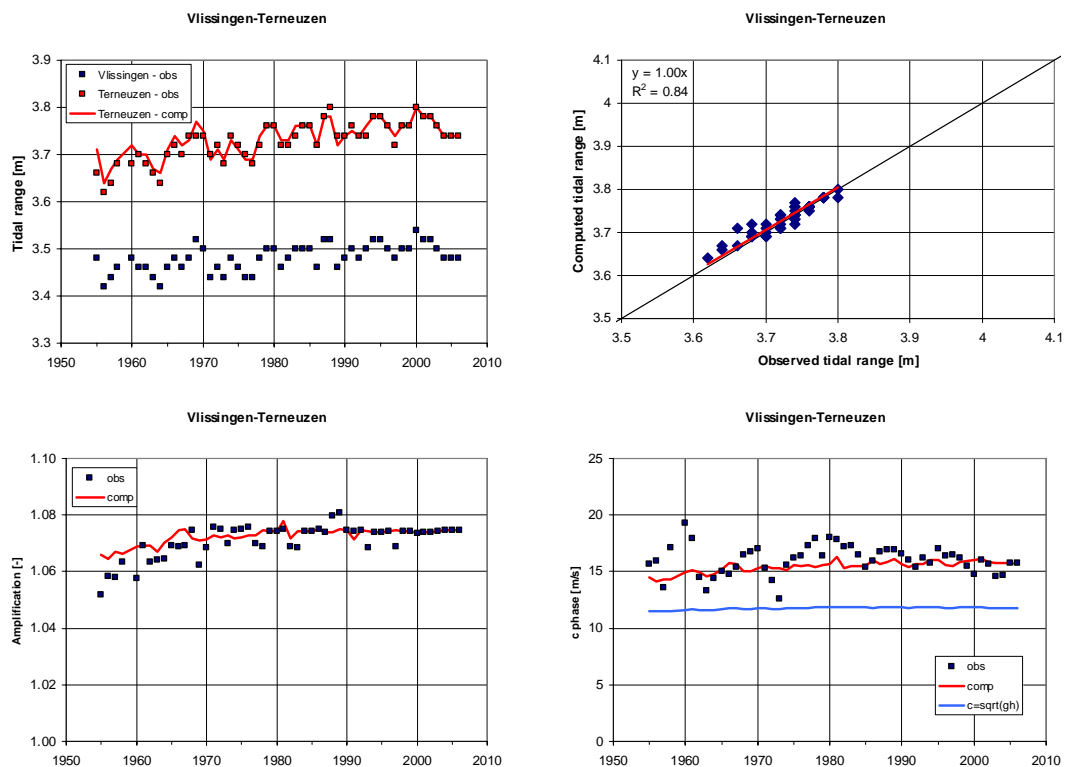


Figuur 3.1: Geuldiepte (links) en verhouding bergende breedte van het intergetijdengebied en geulbreedte (rechts) voor het traject Vlissingen-Terneuzen.



De vergelijking tussen de waargenomen en berekende getijkarakteristieken in Terneuzen voor de periode 1955-2008 is weergegeven in Figuur 3.2.

- Waargenomen 'getijslag' ( $= 2 \cdot M_2$ -ampl.) in Vlissingen (als randvoorwaarde) en Terneuzen en berekende getijslag in Terneuzen (linksboven);
- Regressie tussen waargenomen en berekende getijslag in Terneuzen (rechtsboven);
- Waargenomen en berekende amplificatie van de getijslag in Terneuzen (linksonder);
- Waargenomen en berekende getijvoortplantingssnelheid voor het traject Vlissingen-Terneuzen (rechtsonder).



Figuur 3.2: Waargenomen  $2 \cdot M_2$ -amplitude in Vlissingen en waargenomen en berekende  $2 \cdot M_2$ -amplitude in Terneuzen (boven links), regressie tussen waargenomen en berekende  $2 \cdot M_2$ -amplitude in Terneuzen (boven rechts), amplificatie van  $M_2$ -amplitude in Terneuzen (beneden links) en waargenomen en berekende  $M_2$ -getijvoortplantingssnelheid voor de sectie Vlissingen-Terneuzen (beneden rechts).

De resultaten laten zien dat met de ingestelde modelparameters (onveranderlijk voor de opvolgende jaren) de grootte van de amplificatie en de getijvoortplantingssnelheid kunnen worden gereproduceerd. De verdieping van de geul tussen 1955 en 1980 vertaalt zich in een toename van de amplificatie die door het model wat wordt onderschat. De grootte van de voortplantingssnelheid van de getijgolf ( $c$ ) wordt qua grootte gereproduceerd (groter dan volgt uit  $c = \sqrt{(gh_{ch})}$ ). De waargenomen variatie wordt door het model onderschat.

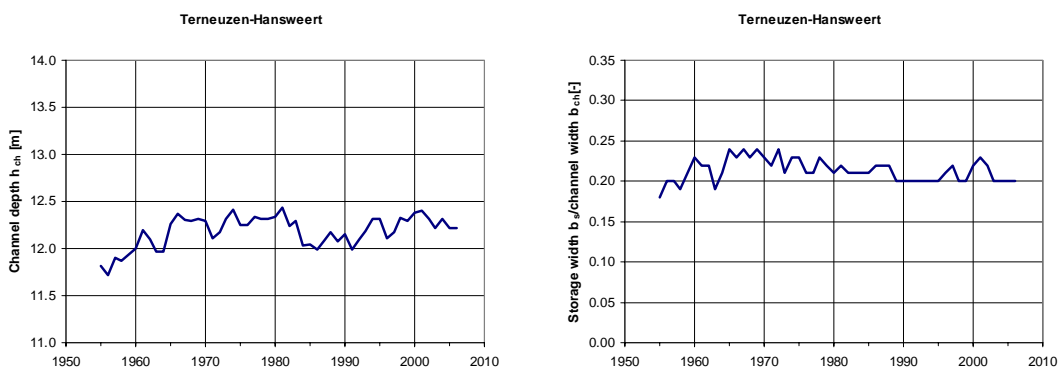
## Terneuzen-Hansweert

De invoergegevens voor het model zijn vermeld in Tabel 3.2.

Tabel 3.2: Invoer voor het analytische model voor de sectie Terneuzen-Hansweert.

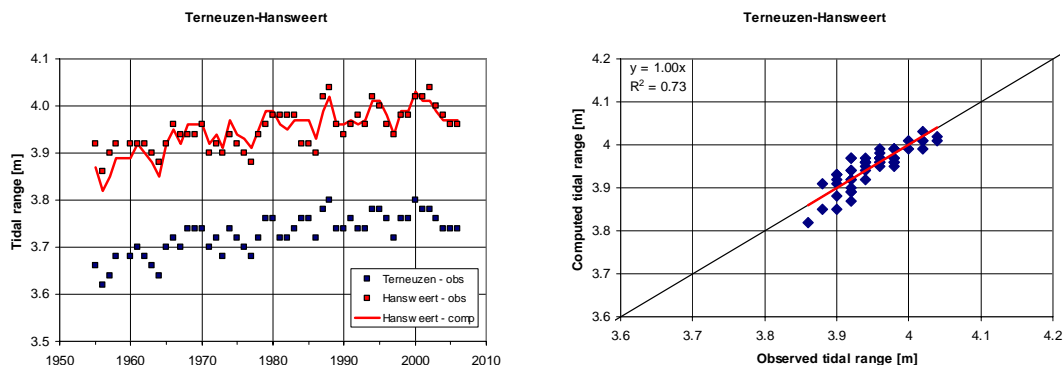
Invoer voor het model		
Getijperiode	T	45000 s
Nikuradse ruwheid	k	0,08 m
Convergentie lengte	$L_a$	33000 m
Sectie lengte	L	18000 m
Afgeleide grootheden		
Chézy ruwheid	C	$59 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ ( $h_{ch} = 12 \text{ m}$ )
Manning ruwheid	n	$0,026 \text{ s/m}^{1/3}$

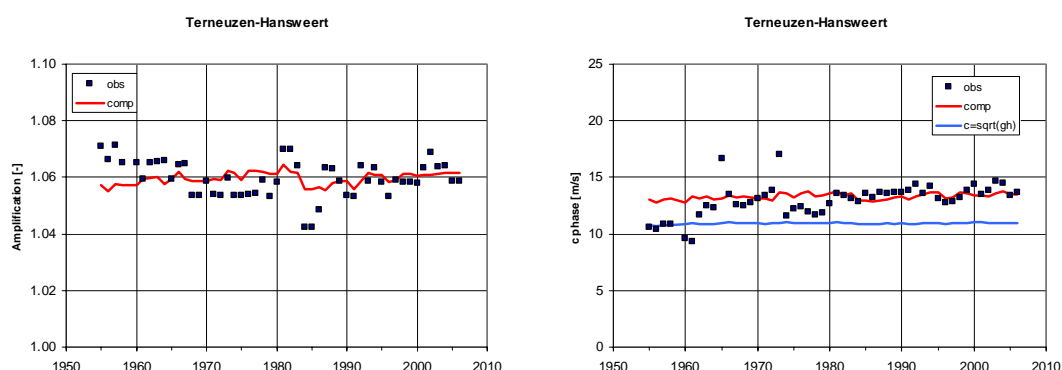
De geuldiepte  $h_{ch}$  en de verhouding tussen de bergende breedte van het intergetijdengebied  $\Delta b$  en de geulbreedte  $b_{ch}$  zijn weergegeven in Figuur 3.3.



Figuur 3.3: Geuldiepte (links) en verhouding bergende breedte van het intergetijdengebied en geulbreedte (rechts) voor het traject Terneuzen-Hansweert.

De vergelijking tussen de waargenomen en berekende getijkenmerken voor de periode 1955-2008 is weergegeven in Figuur 3.4.





Figuur 3.4: Waargenomen  $2*M2$ -amplitude in Terneuzen en waargenomen en berekende  $2*M2$ -amplitude in Hansweert (boven links), regressie tussen waargenomen en berekende  $2*M2$ -amplitude in Hansweert (boven rechts), amplificatie van  $M2$ -amplitude in Hansweert (beneden links) en waargenomen en berekende  $M2$ -getijvoortplantingssnelheid voor de sectie Terneuzen-Hansweert (beneden rechts).

Figuur 3.4 toont dat de grootte van de amplificatie tussen Terneuzen en Hansweert goed wordt gereproduceerd, maar met minder variatie. Er is geen toe- of afname van de amplificatie, vermoedelijk omdat de geul gedurende de periode 1955-2008 niet is verdiept of verondiept. De grootte van de getijvoortplantingssnelheid wordt goed gereproduceerd, behalve tussen 1955 en 1965, waar de snelheid door het model wordt overschat.

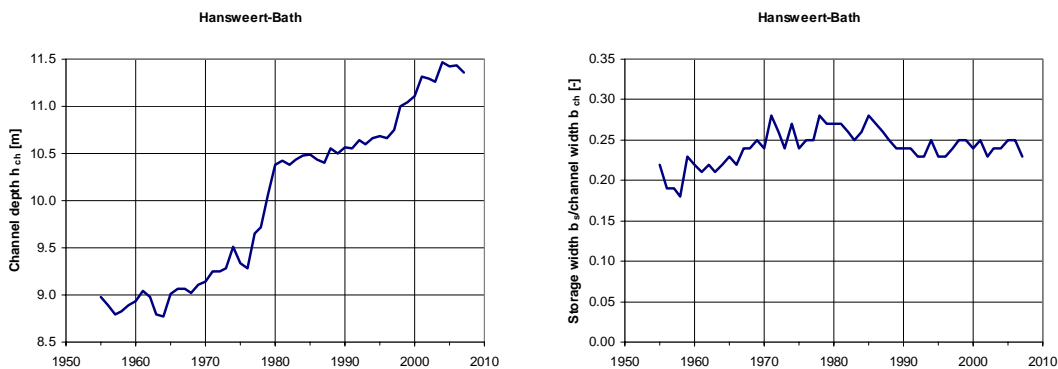
### Hansweert-Bath

De invoergegevens voor het model zijn vermeld in Tabel 3.3.

Tabel 3.3: Invoer voor het analytische model voor de sectie Hansweert-Bath.

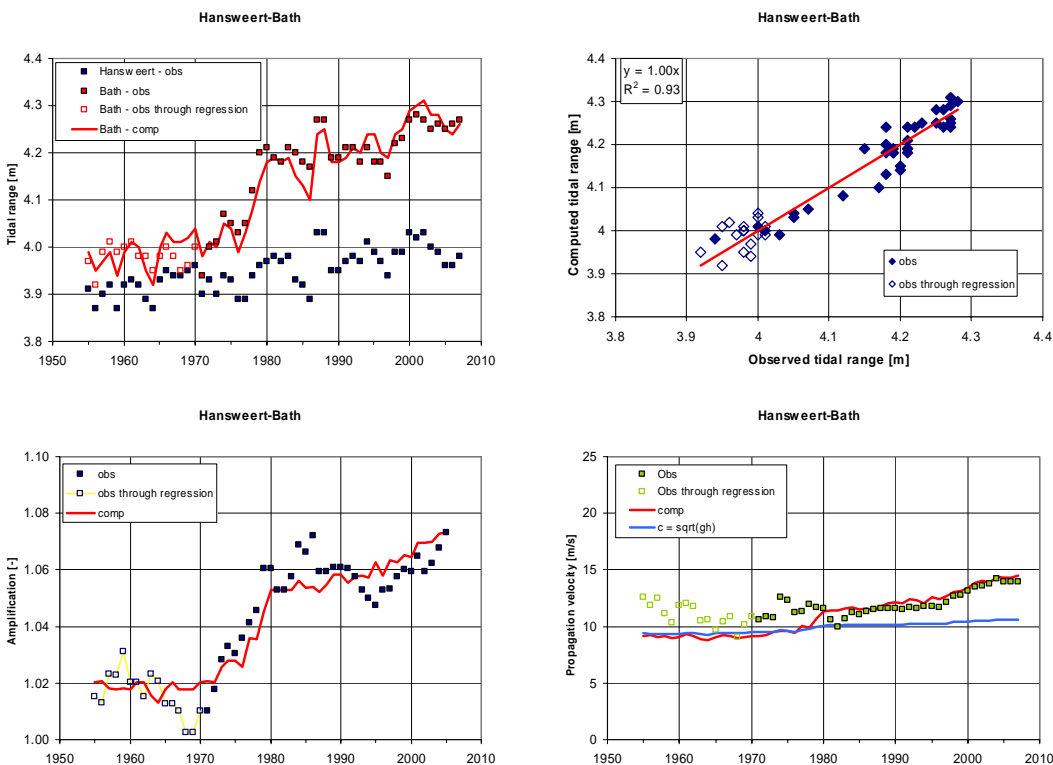
Invoer voor het model		
Getijperiode	T	45000 s
Nikuradse ruwheid	k	0,08 m
Convergentie lengte	$L_a$	27000 m
Sectie lengte	L	19000 m
Afgeleide grootheden		
Chézy ruwheid	C	$57 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ ( $h_{ch} = 10 \text{ m}$ )
Manning ruwheid	n	$0,026 \text{ s/m}^{1/3}$

De geuldiepte  $h_{cc}$  en de verhouding tussen de bergende breedte van het intergetijdengebied  $\Delta b$  en de geulbreedte  $b_{ch}$  zijn weergegeven in Figuur 3.5.



Figuur 3.5: Geuldiepte (links) en verhouding bergende breedte van het intergetijdengebied en geulbreedte (rechts) voor het traject Hansweert-Bath.

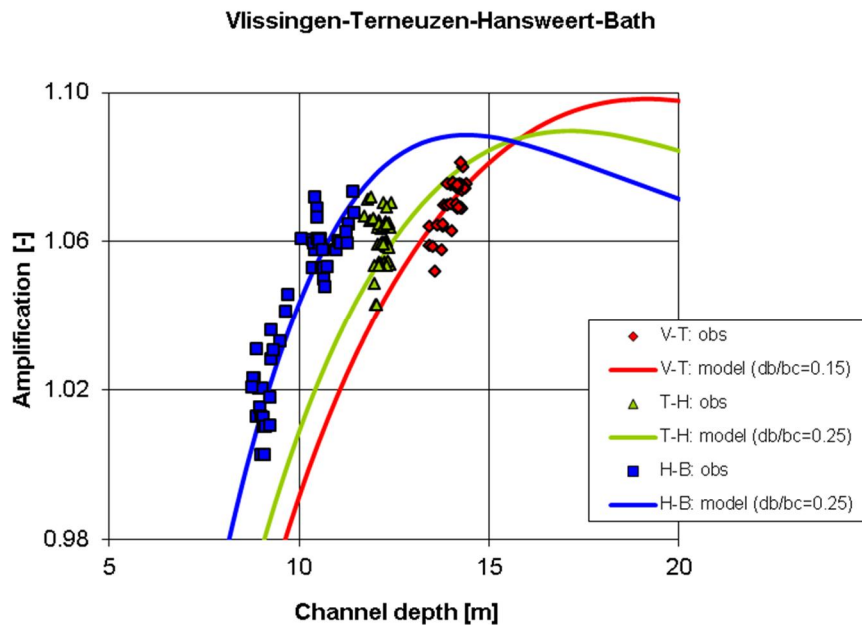
De vergelijking tussen de waargenomen en berekende getijkarakteristieken voor de periode 1955-2008 is weergegeven in Figuur 3.6. Informatie over de M2-amplitude en –fase is niet beschikbaar vóór 1971. Deze zijn gereconstrueerd door een regressie uit te voeren tussen deze parameters en de getijslag en looptijden van hoog- en laagwater voor de periode na 1971.



Figuur 3.6: Waargenomen  $2 \times M_2$ -amplitude in Hansweert en waargenomen en berekende  $2 \times M_2$ -amplitude in Bath (boven links), regressie tussen waargenomen en berekende  $2 \times M_2$ -amplitude in Bath (boven rechts), amplificatie van  $M_2$ -amplitude in Bath (beneden links) en waargenomen en berekende  $M_2$ -getijvoortplantingssnelheid voor de sectie Hansweert-Bath (beneden rechts).

De toename van de amplificatie tussen Hansweert en Bath wordt door het model goed gereproduceerd. Deze toename is vooral het gevolg van de grotere geuldiepte over dit traject. De getijvoortplantingssnelheid wordt qua grootte en trend na 1980 goed gereproduceerd.

Figuur 3.7 geeft voor de drie trajecten de waargenomen en berekende amplificatie als functie van de geuldiepte.



Figuur 3.7: Amplificatie van de M2-amplitude als functie van de geuldiepte voor de secties Vlissingen-Terneuzen (rood), Terneuzen-Hansweert (groen) en Hansweert-Bath (blauw). Symbolen: observaties; lijnen: analytisch model.

Uit Figuur 3.7 volgt dat verdere verdieping van de geul eerst zal resulteren in een toename van de amplificatie. Nadat het maximum voor elk traject is bereikt, zal verdere verdieping langzaam leiden tot een afname van de amplificatie<sup>6</sup>.

Voor het traject Hansweert-Bath wordt in Figuur 3.8 getoond hoe de amplitude van de stroomsnelheid en het debiet varieert als functie van de geuldiepte (voor  $\Delta b/b_{ch} = 0,2$ ). Het debiet  $Q(x, t)$  volgt uit:

$$Q(x, t) = B(x) (h_{ch} + \hat{\eta}(x, t)) \hat{u}(x, t) \quad (3.1)$$

met  $B$  de breedte [m],  $\hat{\eta}$  de amplitude van de waterstand [m] en  $\hat{u}$  de amplitude van de stroomsnelheid [m/s]. Substitutie van (zie Van Rijn, 2011):

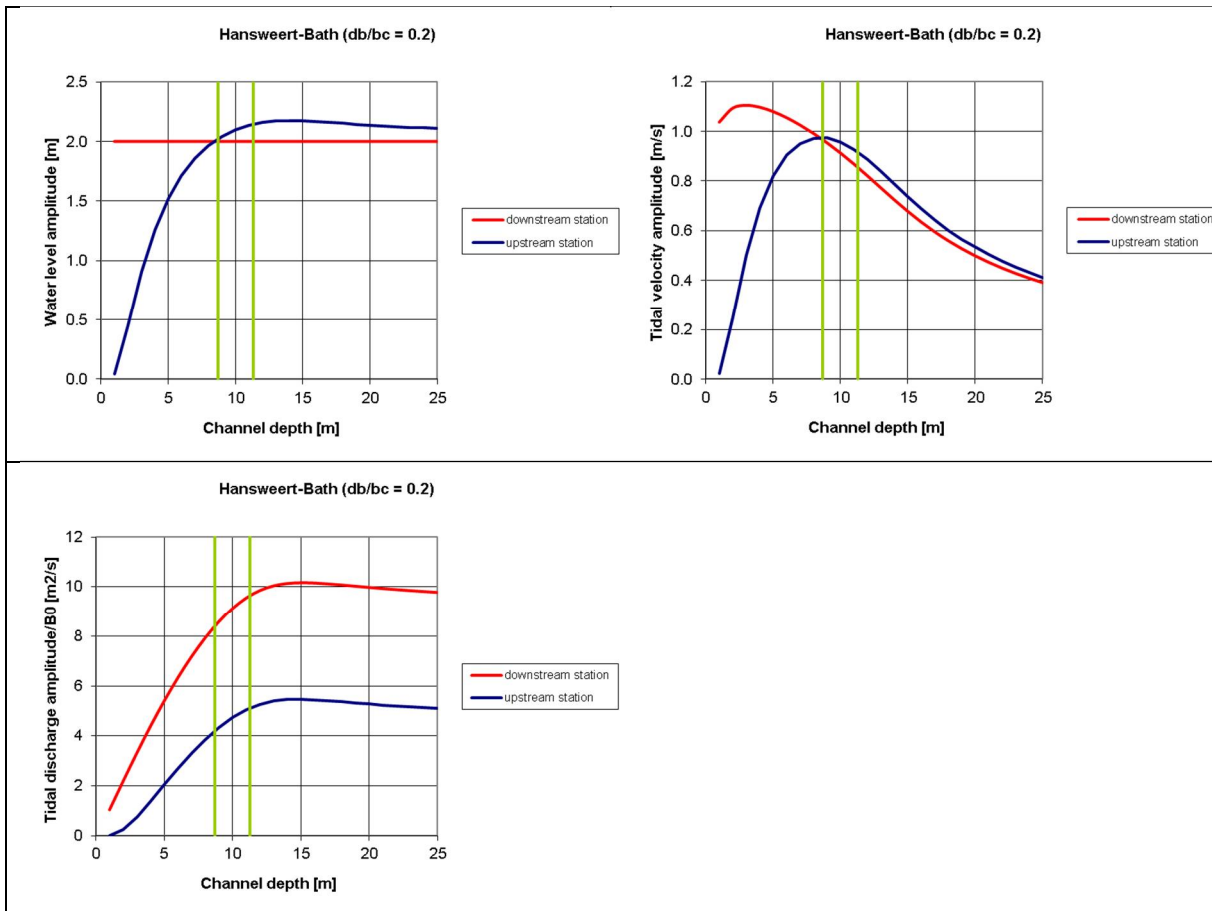
<sup>6</sup> Totdat deze bij zeer grote geuldiepte de waarde 1 bereikt. De lengte van de getijgolf is dan veel groter dan de lengte van het estuariumlengte. In dat geval benaderen de M2-amplitudes in het estuarium die in de mond, zodat de amplificatie 1 wordt.

$$\begin{aligned}\eta(x,t) &= \hat{\eta}_0 e^{\varepsilon x} \cos(\omega t - kx) \\ \hat{u}(x,t) &= \hat{u}_0 e^{\varepsilon x} \cos(\omega t - kx + \varphi)\end{aligned}\quad (3.2)$$

in vgl. (3.1) geeft:

$$\frac{Q(0,t)}{B(0)} = h_{ch} \hat{u}(0) \cos(\omega t + \varphi) + 0,5 \hat{\eta}(0) \hat{u}(0) \cos \varphi + 0,5 \hat{\eta}(0) \hat{u}(0) \cos(2\omega t + \varphi) \quad (3.3)$$

met  $h_{ch}$  de geuldiepte [m] en  $\omega$  de frequentie van de M2-component. De tweede term in het rechterlid is de zgn. Stokes drift.



Figuur 3.8: M2-amplitude van waterstand, stroomsnelheid en debiet (genormaliseerd met de breedte ter plaatse van Hansweert) in Hansweert en Bath volgens het analytische model. De groene lijnen tonen de band waarbinnen de gemiddelde geuldiepte tussen Hansweert en Bath is toegenomen tussen 1955 en 2008.

De amplitude van het debiet voor de component met frequentie  $\omega$  in het afwaartse station van het traject is dus:

$$\hat{Q}(0) = B(0) \hat{u}(0) h_{ch} \quad (3.4a)$$

De amplitude van het debiet in het opwaartse station volgt op identieke wijze:

$$\hat{Q}(L) = B(L) \hat{u}(L) h_{ch} \quad (3.4b)$$

met  $B(L) = B(0) e^{-L/L_b}$

De M2-amplitude in Hansweert is voor alle geuldiepten 2 m verondersteld. In het opwaartse station Bath neemt de amplitude van de waterstand eerst toe met de geuldiepte omdat de ruwheid afneemt. Voor geuldiepten groter dan ongeveer 13 m neemt de M2-amplitude weer langzaam af. De amplitude van de stroomsnelheid in Bath neemt eerst toe (toename waterstandsvariatie) maar voor geuldiepten groter dan ongeveer 9 m weer af, omdat de waterdiepte bepalend wordt. De stroomsnelheid in het afwaartse en opwaartse station verschilt dan weinig. De amplitude van het debiet verandert weinig voor waterdiepten groter dan ongeveer 10 m, omdat de afname van de stroomsnelheid wordt gecompenseerd door de toename van de waterdiepte. De amplitude van het getijdebiet in het opwaartse station (Bath) is wel kleiner dan die in het afwaartse station (Hansweert), omdat de breedte exponentieel afneemt in opwaartse richting. Bij grotere geuldiepten heeft een toename van de geuldiepte weinig invloed op het getijdebiet en het getijvolume. Opgemerkt wordt, dat het model niet geldig is voor relatief kleine waterdiepten, omdat verondersteld is dat de waterstandsamplitude substantieel kleiner is dan de waterdiepte (lineaire benadering).

### 3.3 Beneden-Zeeschelde

Voor de Beneden-Zeeschelde is de hoeveelheid beschikbare data beperkter dan voor de Westerschelde. Bathymetrieën zijn beschikbaar voor 11 jaren terwijl voor het getij geen informatie is over de M2-amplitude en M2-fase (de parameters waarmee het model het beste kan worden toegepast). Wel geldt dat de beschikbare bodems verder terug gaan in de tijd (tot 1910). Voor de Westerschelde zijn bodems vanaf 1955 gebruikt.

In deze paragraaf wordt de toepassing van het analytische model voor de trajecten Bath-Liefkenshoek, Liefkenshoek-Antwerpen en Antwerpen-Schelle beschreven. Hierbij zijn de modelresultaten vergeleken met de amplificatie van de getijslag, zijnde het verschil tussen hoog- en laagwater, en de looptijden van hoog- en laagwater. Bij de kalibratie is gestreefd naar een optimaal resultaat voor de amplificatie en niet een optimale reproductie van de getijvoortplantingssnelheid. Verder geldt dat watervolumes boven het intergetijdengebied voor de jaren 1910 en 1930 niet beschikbaar zijn. Om toch deze jaren in de simulaties mee te kunnen nemen zijn de watervolumes op de intergetijdengebieden geschat door terugwaartse extrapolatie van de volumes van 1930 en in opvolgende jaren.

De resultaten worden beknopt besproken.

De sectielengten en gekalibreerde waarden voor de convergentielengte  $L_a$  [km], Nikuradse-ruwheid  $k$  [m] en afgeleide Manning-ruwheid  $n$  [s/m<sup>1/3</sup>] zijn vermeld in Tabel 3.4. Volledigheidshalve worden ook de trajecten op de Westerschelde vermeld.

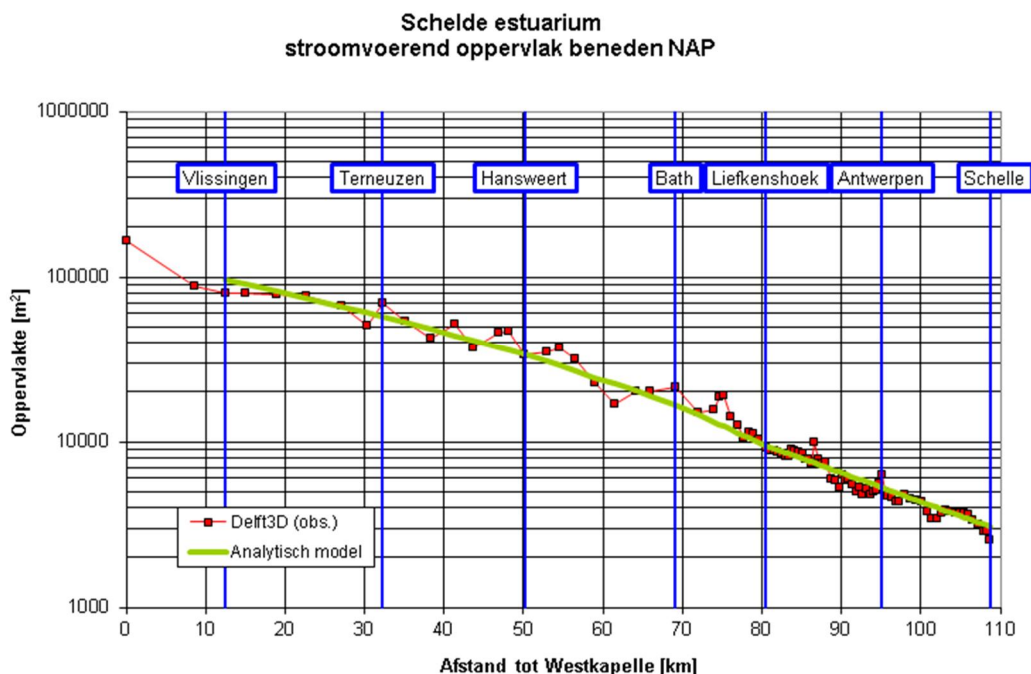
Tabel 3.4: Modelparameters: sectielengte  $L$ , convergentielengte  $L_a$ , Nikuradse-ruwheid  $k$  en Manning-ruwheid  $n$  per traject in de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde.

Traject	$L$ [km]	$L_a$ [km]	$k$ [m]	$n$ [s/m <sup>1/3</sup> ]
Vlissingen-Terneuzen	19,5	39	0,10	0,027
Terneuzen-Hansweert	18,0	33	0,08	0,026

Traject	L [km]	L <sub>a</sub> [km]	k [m]	n [s/m <sup>1/3</sup> ]
Hansweert-Bath	19,0	27	0,08	0,026
Bath-Liefkenshoek	11,3	20	0,035	0,023
Liefkenshoek-Antwerpen	14,5	25	0,15	0,029
Antwerpen-Schelle	13,6	25	0,15	0,029

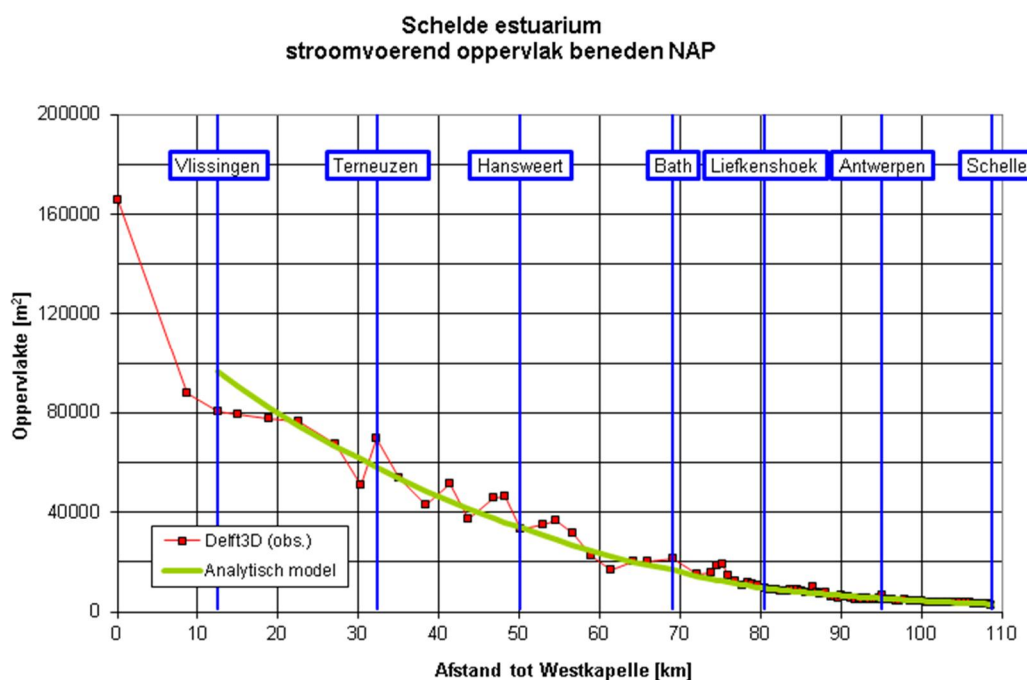
Hierbij valt op dat de kalibratie leidt tot een relatief lage ruwheid tussen Bath en Liefkenshoek.

Met de gekalibreerde waarden voor de convergentielengte (per traject) kan het verloop van het stroomvoerend oppervlak langs het estuarium (Vlissingen-Schelle) worden teruggerekend uitgaande van een gekozen waarde in de monding. In Figuur 3.9a (verticale as: logaritmisch) en Figuur 3.9b (verticale as: lineair) worden de berekende doorstroomoppervlakten (groene lijn) vergeleken met de stroomvoerende oppervlakten van een Delft3D-schematisatie gebaseerd op waarnemingen voor het jaar 1998 (rode lijn en symbolen). Hieruit volgt dat met de gekozen convergentielengten voor de drie trajecten het doorstroomoppervlak realistisch wordt beschreven. De convergentielengten voor de afzonderlijke trajecten zijn onveranderlijk in de tijd verondersteld.



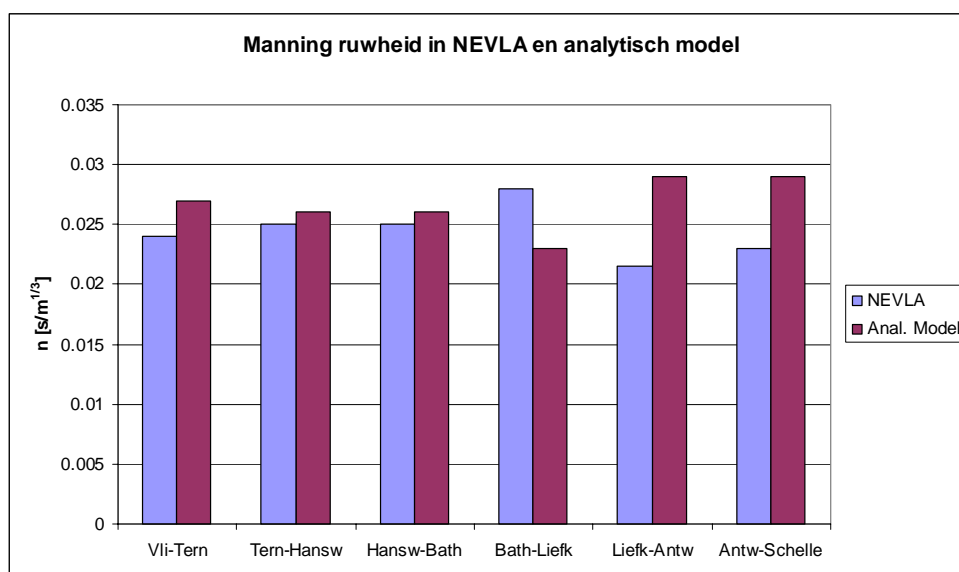
Figuur 3.9a: Stroomvoerend oppervlak (logaritmische verticale schaal) langs het estuarium volgens Delft3D (1998) en het analytische model.





Figuur 3.9b: Stroomvoerend oppervlak (lineaire verticale schaal) langs het estuarium volgens Delft3D (1998) en het analytisch model.

Opgemerkt wordt, dat de modelresultaten gevoelig zijn voor variaties in de kalibratieparameters  $L_a$  en  $k$ . Figuur 3.10 toont de gekalibreerde waarden voor de ruwheid (als Manning waarde) en de vergelijking met de waarden in het NEVLA-model, zoals gebruikt in LTV V&T-rapport G-4.



Figuur 3.10: Manning-ruwheid in NEVLA-model en analytisch model.

Voor het traject Vlissingen-Bath stemmen de ruwheden tussen beide modellen goed overeen met iets hogere waarden in het analytische model. Tussen Bath en Liefkenshoek is de ruwheid in het analytische model wat kleiner en op de Beneden-Zeeschelde tussen

Liefkenshoek en Schelle groter. Gemiddeld voor het gehele traject tussen Vlissingen en Schelle volgt:

- NEVLA-model:  $n = 0,024 \text{ s/m}^{1/3}$
- Analytisch model:  $n = 0,027 \text{ s/m}^{1/3}$ .

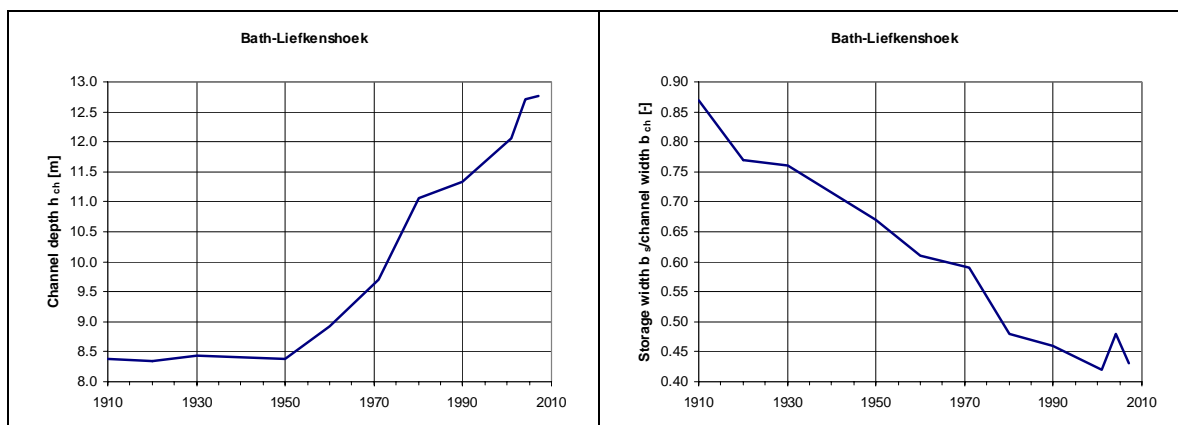
De wat grotere ruwheid in het analytische model (behalve voor traject Bath-Liefkenshoek) kan het gevolg zijn van het onderbrengen van energieverliezen ten gevolge van circulaties in de bodemruwheid. In numerieke modellen worden deze energieverliezen expliciet gemodelleerd.

### 3.3.1 Bath-Liefkenshoek

Het verloop van de geuldiepte  $h_{ch}$  en de parameter  $\Delta b/b_{ch}$  (de verhouding tussen de bergende breedte van het intergetijdengebied ( $\Delta b$ ) en de geulbreedte ( $b_{ch}$ )) is weergegeven in Figuur 3.11<sup>7</sup>. Hierbij zijn drie perioden te onderscheiden:

- 1910-1950: de geuldiepte is constant en de parameter  $\Delta b/b_{ch}$  neemt af met  $0,2/30$  jaar  $= 0,0067/\text{jaar}$ ;
- 1950-1980: de geuldiepte neemt toe met  $2,5 \text{ m}/30$  jaar  $= 0,083 \text{ m/jaar}$  en de parameter  $\Delta b/b_{ch}$  neemt af met  $0,2/30$  jaar  $= 0,0067/\text{jaar}$ ;
- 1980-2007: de geuldiepte neemt toe met  $1,7 \text{ m}/27$  jaar  $= 0,063 \text{ m/jaar}$  en de parameter  $\Delta b/b_{ch}$  neemt af met  $0,05/27$  jaar  $= 0,0019/\text{jaar}$ .

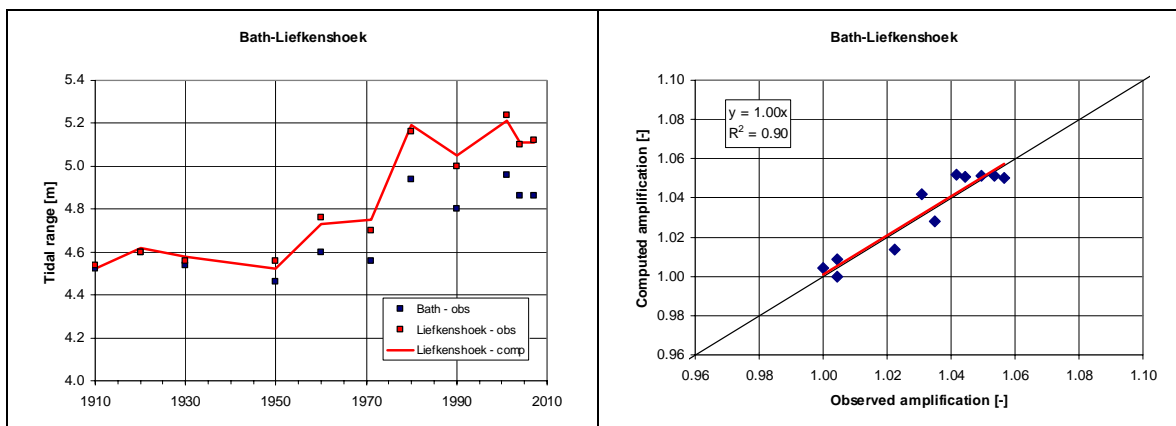
Tussen 1910 en 1950 zijn de veranderingen van het getij voor het traject Bath en Liefkenshoek alleen het gevolg van veranderingen in de waterberging op het intergetijdengebied (parameter  $\Delta b/b_{ch}$ ). Tussen 1950 en 1980 is er additioneel t.o.v. de voorafgaande periode een verdieping van de vaargeul en zullen de veranderingen in het getij dus groter zijn. Voor de opvolgende periode 1980-2007 zijn de veranderingen in de geuldiepte en de parameter  $\Delta b/b_{ch}$  kleiner dan tussen 1950 en 1980 en de veranderingen in het getij zullen dus eveneens kleiner zijn.



Figuur 3.11: Bath-Liefkenshoek: geuldiepte  $h_c$  (links) en  $\Delta b/b_c$  (rechts).

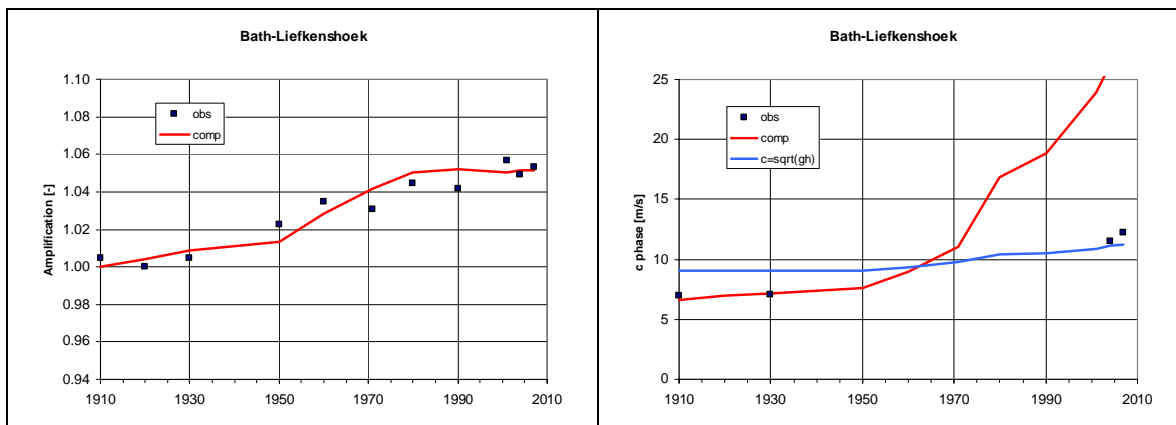
In Figuur 3.12 wordt de waargenomen en berekende getijslag in Liefkenshoek getoond. Voor de berekening is als randvoorwaarde de getijslag in Bath gebruikt. Ook geeft Figuur 3.12 de correlatie tussen de berekende en waargenomen amplificatie. Gemiddeld voor alle jaren wordt de amplificatie goed door het model gereproduceerd (helling regressielijn = 1) en de bijbehorende regressiecoëfficiënt is groot ( $r^2 = 0,90$ ).

<sup>7</sup> De geuldiepte beneden TAW (zie LTV V&T rapport G-6) is vermeerderd met 3 m zijnde de halve hoogte van het intergetijdengebied.

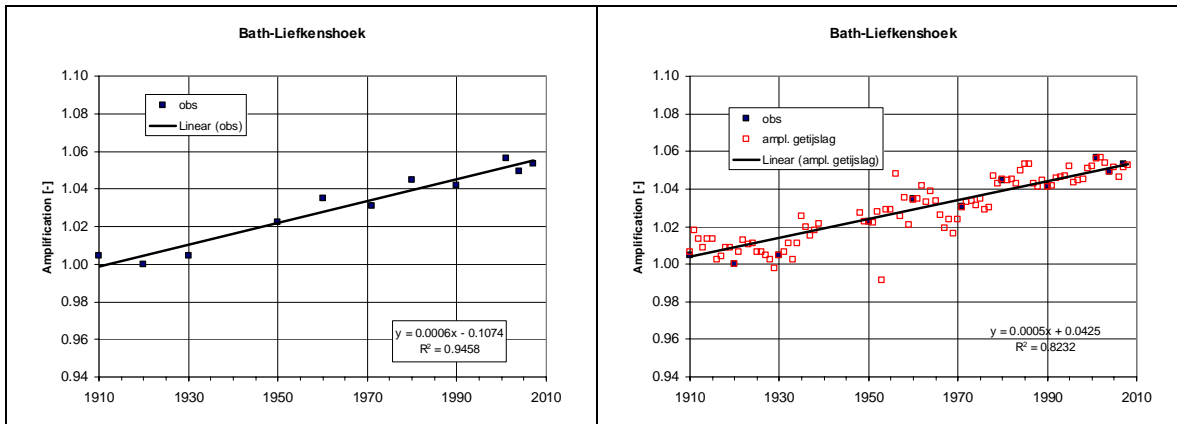


Figuur 3.12: Bath-Liefkenshoek: getijslag (links) en correlatie waargenomen en berekende amplificatie (rechts).

Figuur 3.13 toont het waargenomen en berekende tijdsverloop van de amplificatie, alleen voor de jaren waarvoor een bodem beschikbaar is. Gemiddeld gesproken volgt het model de waargenomen verandering van de amplificatie goed. Het model geeft aan dat vanaf 1980 de amplificatie vrijwel niet meer verandert. Voor de waarnemingen zou ook een lineair verloop verondersteld kunnen worden, zie Figuur 3.14 (zowel voor alleen de kalibratiejaren als voor alle jaren). De getijvoortplantingssnelheid wordt door het model met meer dan een factor 2 overschat.



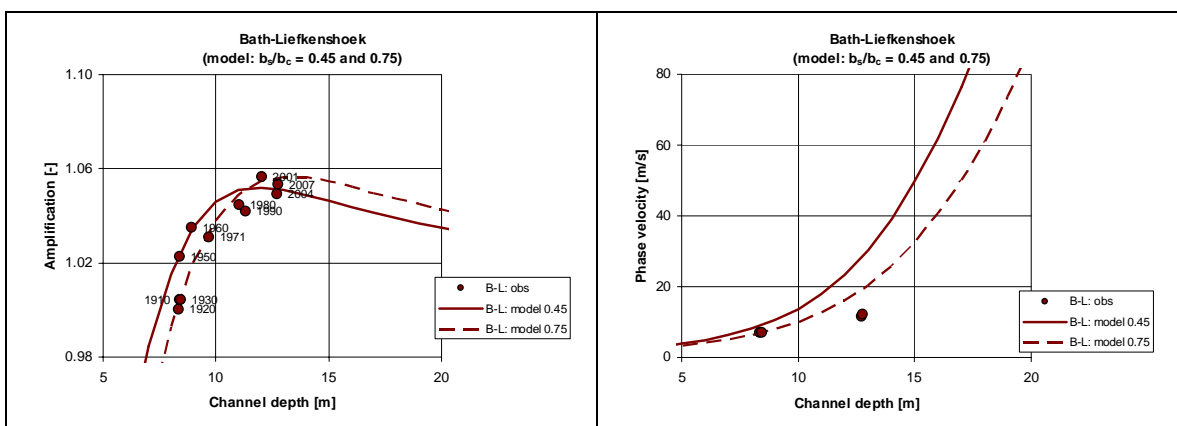
Figuur 3.13: Bath-Liefkenshoek: amplificatie getijslag (links) en getijvoortplantingssnelheid (rechts).



Figuur 3.14: Verloop van de amplificatie tussen Bath en Liefkenshoek en lineaire benadering voor de jaren met een beschikbare bathymetrie (links) en voor alle jaren (rechts).

Uit het voorgaande volgt, dat het analytische model weliswaar de tijdsafhankelijke verandering van de waargenomen amplificatie goed reproduceert, resulterend in een afvallend verloop, maar dat een ander tijdsverloop even goed mogelijk is. De waarnemingen zijn niet onderscheidend genoeg om hierover uitsluitel te geven. Belangrijk verschil is natuurlijk wel dat het analytische model een degelijke theoretische verklaring levert.

In Figuur 3.15 wordt de waargenomen amplificatie als functie van de geuldiepte getoond. Bij toenemende geuldiepte is de verandering van de amplificatie per eenheid van verdieping kleiner. Berekeningen met het model geven een soortgelijke afhankelijkheid van de amplificatie van de geuldiepte. De modelberekeningen worden getoond voor twee waarden van de parameter  $\Delta b/b_{ch}$ , nl. 0,75 en 0,45 (representatief voor het begin en eind van de periode 1910-2007).

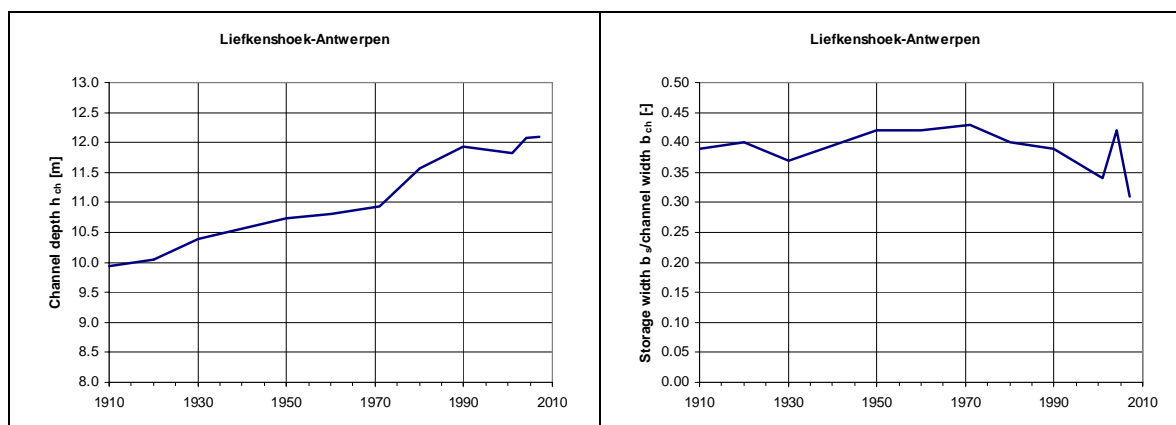


Figuur 3.15: Bath-Liefkenshoek: waargenomen en berekende amplificatie als functie van de geuldiepte (links) en waargenomen en berekende getijvoortplantingssnelheid als functie van de geuldiepte (rechts).

Volgens het analytische model is momenteel de amplificatie van de getijslag over het traject Bath-Liefkenshoek maximaal. Verdere toename van de geuldiepte zou voor dit traject gaan leiden tot een (beperkte) afname van de amplificatie. Verder zal volgens het model bij een grotere geuldiepte (overeenkomend met de waarden die geobserveerd zijn na 2000) de amplificatie toenemen als de berging op het intergetijdengebied (parameter  $\Delta b/b_{ch}$ ) toeneemt.

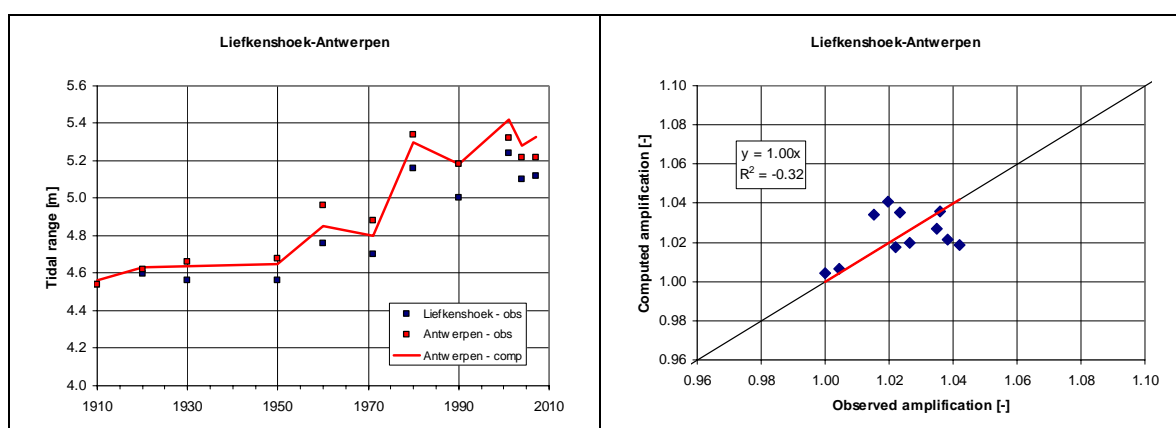
### 3.3.2 Liefkenshoek-Antwerpen

Het verloop van de geuldiepte  $h_{ch}$  en de parameter  $\Delta b/b_{ch}$  die de verhouding tussen de bergende breedte van het intergetijdengebied ( $\Delta b$ ) en de geulbreedte ( $b_{ch}$ ) weergeeft, zijn weergegeven in Figuur 3.16. Er is sprake van een toename van de geuldiepte (in ieder geval tot ca. 1990) en een berging op het intergetijdengebied die weinig verandert (in ieder geval tot ca. 1990).



Figuur 3.16: Liefkenshoek-Antwerpen: geuldiepte  $h_c$  (links) en  $\Delta b/b_c$  (rechts).

In Figuur 3.17 wordt de waargenomen en berekende getijslag in Antwerpen getoond. Ook geeft de figuur de correlatie tussen de berekende en waargenomen amplificatie. De correlatie tussen berekende en waargenomen amplificatie is slechter dan bij traject Bath-Liefkenshoek en zelfs negatief.

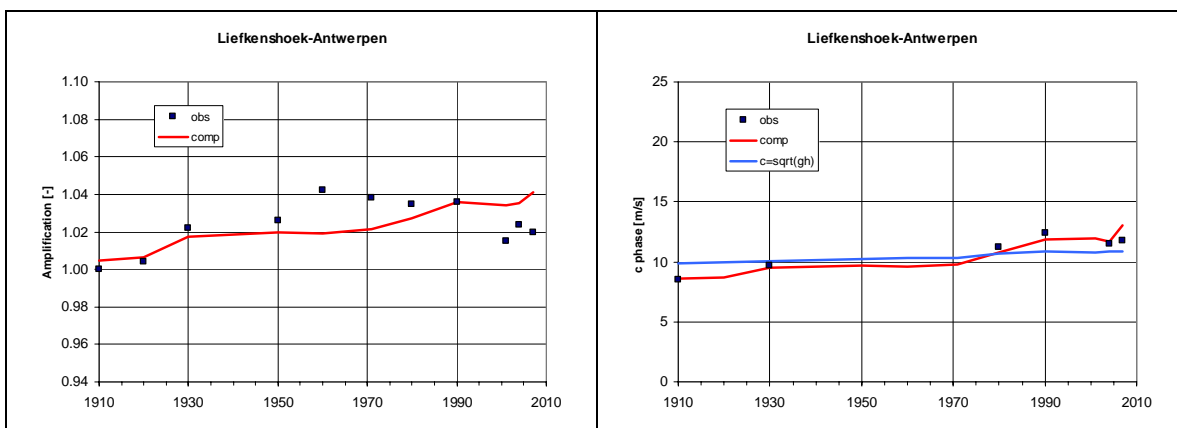


Figuur 3.17: Liefkenshoek-Antwerpen: getijslag (links) en correlatie waargenomen en berekende amplificatie (rechts).

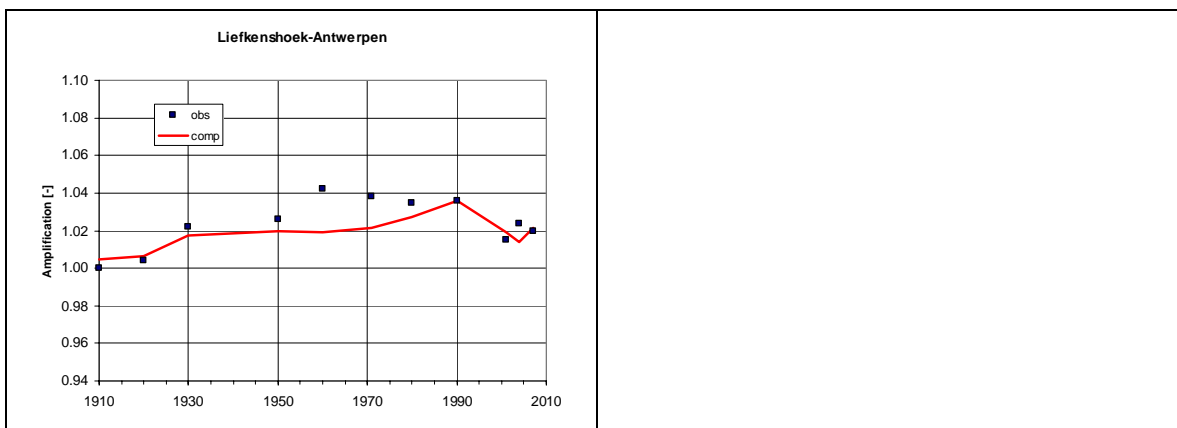
Figuur 3.18a toont het waargenomen en berekende tijdsverloop van de amplificatie. Ook hieruit volgt, dat het model de waarnemingen niet goed reproduceert. Opvallend is dat de waargenomen amplificatie voor 2001, 2004 en 2007 lager is dan gedurende de voorafgaande periode. De geuldiepte verandert na 1990 weinig terwijl voor de parameter  $\Delta b/b_{ch}$  sprake lijkt van een afname (minder berging). De oorzaak van de afname van de amplificatie is onbekend. In 2000 en 2001 is nog wel baggerwerk uitgevoerd i.v.m. de verbreding van de vaargeul (niet bekend is waar dit is gebeurd), zie het achtergronddocument *Systeembeschrijving in de MER Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde*

(2007). Indien in het model de toename van het watervolume in de geul tussen 1990 en 2004 ter grootte van  $3.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  wordt vertaald naar een toename van de convergentielengte ( $L_a = 28.5 \text{ km}$  i.p.v.  $25 \text{ km}$ ) en de geuldiepte constant wordt gehouden aan die in 1990 volgt met het model wel een afname van de amplificatie, zie Figuur 3.18b. Voor het traject Liefkenshoek-Antwerpen is er dus een mogelijke invloed van veranderingen van de convergentielengte op de amplificatie van de getijslag als gevolg van het meer prismatisch maken van de geul. Maar ook kan de aanwezigheid van de vele havenbekkens langs dit traject tot gevolg hebben dat het analytische model minder goed kan worden toegepast.

De getijvoortplantingssnelheid wordt wel door het model gereproduceerd.

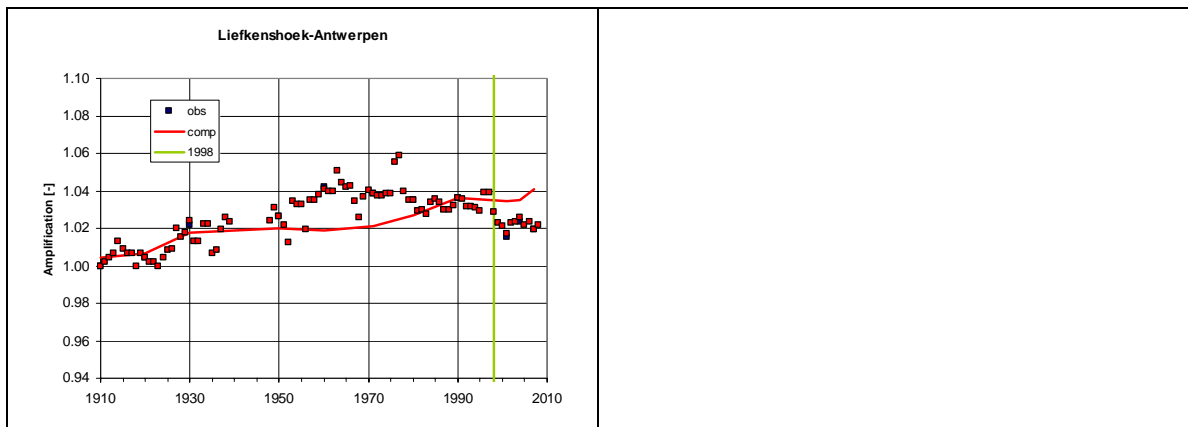


Figuur 3.18a: Liefkenshoek-Antwerpen: amplificatie getijslag (links) en getijvoortplantingssnelheid (rechts).



Figuur 3.18b: Liefkenshoek-Antwerpen: amplificatie getijslag. Voor 2001, 2004 en 2007 is de toename van het watervolume in de geul omgerekend naar een toename van de convergentielengte.

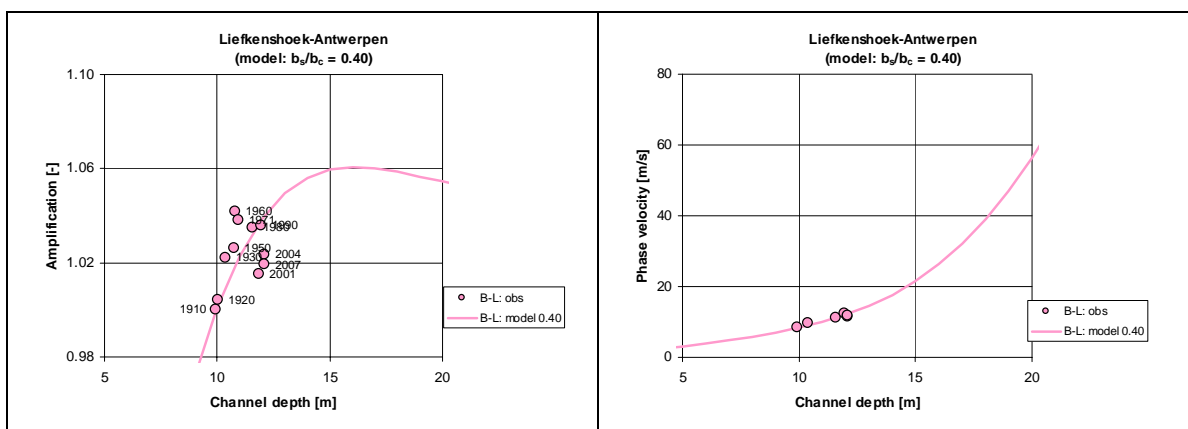
Figuur 3.19 toont, dat de amplificatie tussen Liefkenshoek en Antwerpen na ca. 1998 (valt dan samen met tweede verruiming) is afgenomen. Deze afname kan echter ook deel uitmaken van een trend die al eerder is ingezet, zie ook Figuur 2.15b.



Figuur 3.19: Verloop van de amplificatie tussen Liefkenshoek en Antwerpen voor alle jaren.

In Figuur 3.20 worden de waargenomen amplificatie en de getijvoortplantingssnelheid als functie van de geuldiepte getoond, samen met de door het model berekende waarden (voor  $\Delta b/b_{ch} = 0,40$ ).

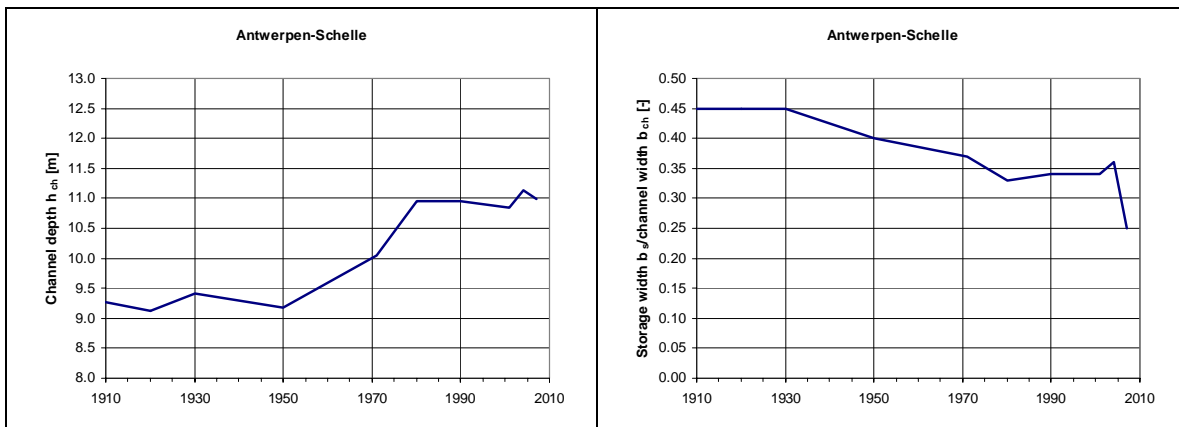
Geconcludeerd wordt dat het analytisch model de waargenomen amplificatie tussen Liefkenshoek en Antwerpen niet goed reproduceert tenzij de convergentielengte wordt aangepast. De getijvoortplantingssnelheid wordt wel goed gereproduceerd.



Figuur 3.20: Liefkenshoek-Antwerpen: waargenomen en berekende amplificatie als functie van de geuldiepte (links) en waargenomen en berekende getijvoortplantingssnelheid als functie van de geuldiepte (rechts).

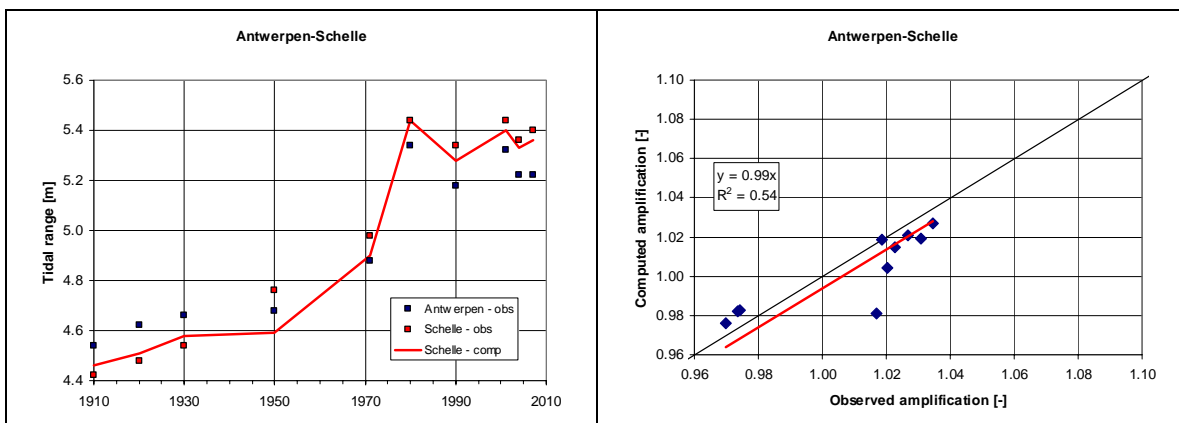
### 3.3.3 Antwerpen-Schelle

Het verloop van de geuldiepte  $h_{ch}$  en de parameter  $\Delta b/b_{ch}$  die de verhouding tussen de bergende breedte van het intergetijdengebied ( $\Delta b$ ) en de geulbreedte ( $b_{ch}$ ) weergeeft, zijn weergegeven in Figuur 3.21. Het watervolume op het intergetijdengebied in 1910 en 1920 is gelijk verondersteld aan het volume in 1930. Tussen 1950 en 1980 is de geuldiepte toegenomen. Voor en na deze periode is de geuldiepte ongeveer constant geweest. De berging op het intergetijdengebied ( $\Delta b/b_{ch}$ ) is tussen 1930 en 1980 afgenomen en t/m 2004 constant gebleven. Het jaar 2007 toont een scherpe afname.



Figuur 3.21: Antwerpen-Schelle: geuldiepte  $h_c$  (links) en  $\Delta b/b_c$  (rechts).

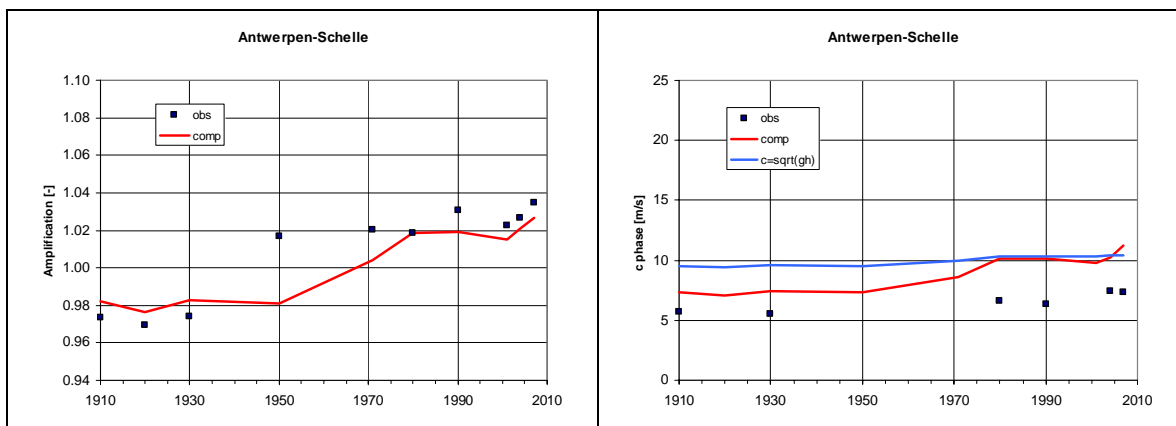
In Figuur 3.22 wordt de waargenomen en berekende getijslag in Schelle getoond. Ook geeft de figuur de correlatie tussen de berekende en waargenomen amplificatie. De correlatie is laag, vooral door de afwijking voor het jaar 1950 (zie hierna).



Figuur 3.22: Antwerpen-Schelle: getijslag (links) en correlatie waargenomen en berekende amplificatie (rechts).

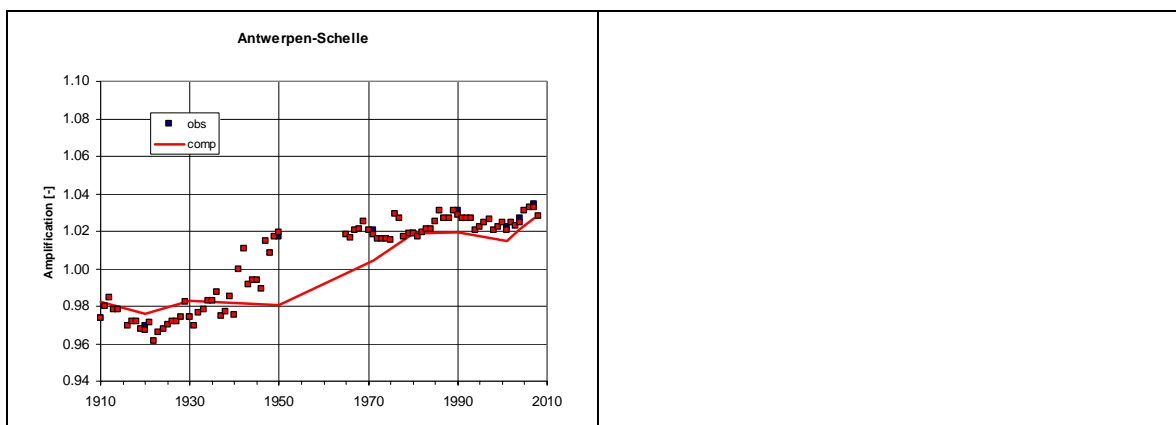
Figuur 3.23 toont het waargenomen en berekende tijdsverloop van de amplificatie. Met uitzondering van het jaar 1950 wordt de amplificatie door het model goed gereproduceerd. Uit het waargenomen verloop volgt dat de amplificatie aan het begin van de periode kleiner is dan 1 (afname getijslag tussen Antwerpen en Schelle) en aan het eind van de periode groter is dan 1 (toename getijslag). De getijdoordringing (de locatie met de maximale getijslag) verschuift dus in landwaartse richting. Het model reproduceert deze verandering. De getijvoortplantingssnelheid wordt door het model overschat.





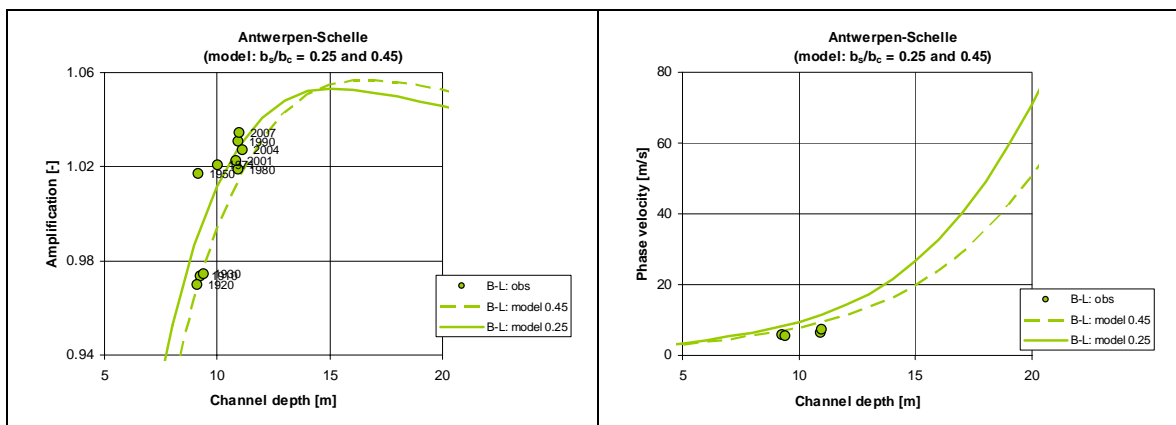
Figuur 3.23: Antwerpen-Schelle: amplificatie getijslag (links) en getijvoortplantingssnelheid (rechts).

Figuur 3.24 toont de amplificatie voor alle jaren. Toename van de getijslag treedt op na 1940.



Figuur 3.24: Verloop van de amplificatie tussen Antwerpen en Schelle voor alle jaren.

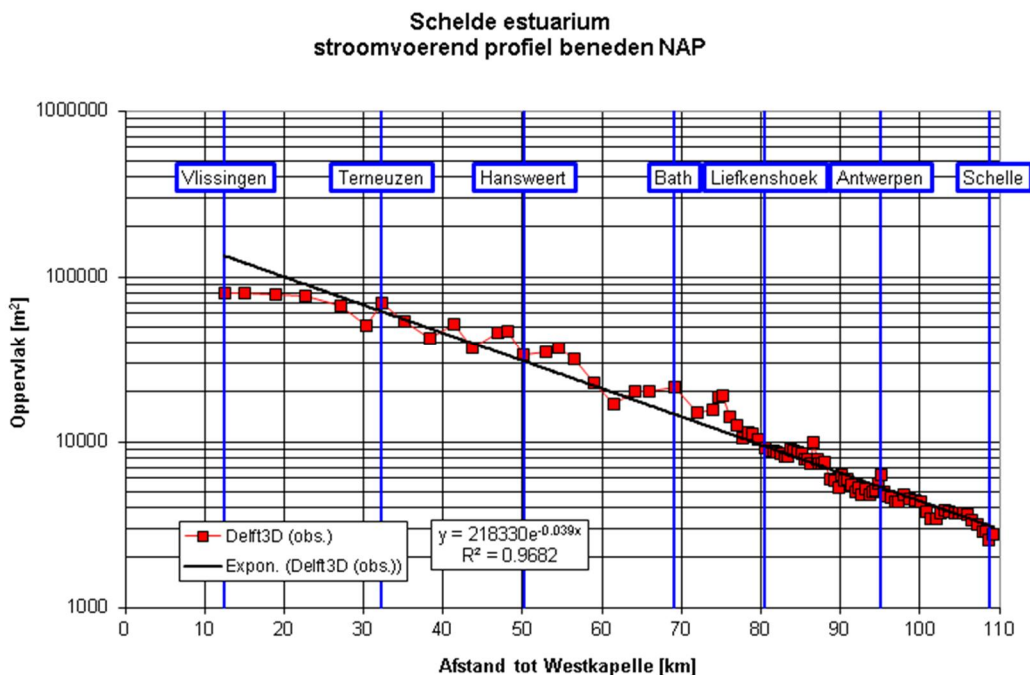
Figuur 3.25 toont de waargenomen amplificatie en de getijvoortplantingssnelheid als functie van de geuldiepte, samen met de door het model berekende waarden (voor  $\Delta b/b_{ch} = 0,45$  en  $0,25$ ). Uitgezonderd 1950 komen de door het model berekende waarden redelijk tot goed overeen met de waarnemingen. Verdere verdieping van de geul en afname van  $\Delta b/b_{ch}$  (minder berging) zal volgens het model leiden tot een toename van de amplificatie.



Figuur 3.25: Antwerpen-Schelle: waargenomen en berekende amplificatie als functie van de geuldiepte (links) en waargenomen en berekende getijvoortplantingssnelheid als functie van de geuldiepte (rechts).

### 3.4 Vliissingen-Antwerpen

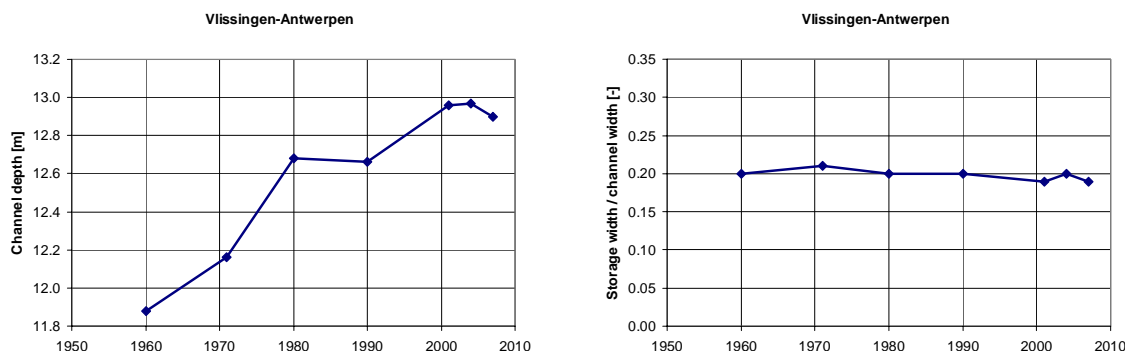
In Par. 3.2 en Par. 3.3 is het analytische model toegepast op afzonderlijke trajecten tussen Vliissingen en Schelle. Hierbij zijn per traject door middel van kalibratie de convergentielengte en ruwheid bepaald. Daarbij is ervoor gezorgd dat voor beide parameters realistische waarden zijn gebruikt. De convergentielengte beschrijft de afname van de oppervlakte van het doorstroomprofiel conform de bodem van 1998 (ontleend aan Delft3D) en de ruwheid is in overeenstemming met de waarden zoals die ook in de numerieke modellen voor het estuarium worden gebruikt. Formeel is echter het model alleen toepasbaar op een schematisatie met één convergentielengte, één ruwheidswaarde en ook één waterdiepte. Om na te gaan hoe het model zich voor een dergelijke situatie gedraagt, is het estuarium tussen Vliissingen en Antwerpen geschematiseerd met één convergentielengte, één ruwheidswaarde en ook één geuldiepte. De convergentielengte is ontleend aan de doorstroomoppervlakten in afzonderlijke raaien tussen Vliissingen en Schelle volgens de Delft3D-bodem van 1998, zie Figuur 3.26. In tegenstelling tot de berekening van de amplificatie van de M2-amplitude voor de secties in de Westerschelde wordt nu de amplificatie van de getijslag bepaald. Er zijn namelijk geen gegevens beschikbaar over de M2-amplitude in de stations langs de Beneden-Zeeschelde.



Figuur 3.26: Stroomvoerend oppervlak tussen Vliissingen en Schelle.

De convergentielengte, bepaald met een exponentiële regressie, is  $1/0,0391 = 25,6$  km (zie Figuur 3.26). De Nikuradse ruwheid  $k$  na kalibratie is 0,12 m. De sectielengte tussen Vliissingen en Antwerpen is het totaal van de afzonderlijke lengtes zoals vermeld in Tabel 3.4 en bedraagt 82 km. De invoer voor het model heeft betrekking op het watervolume en het (horizontale) oppervlak van de geul en het watervolume op het intergetijdengebied. Deze zijn bepaald als de som van de afzonderlijke trajecten zoals gebruikt in Par. 3.2 en Par. 3.3. Hieruit wordt door het model de geuldiepte ( $h_c$ ) en de verhouding tussen de bergende breedte van het intergetijdengebied en de geulbreedte ( $\Delta b/b_c$ ) berekend, zie Figuur 3.27. De bodems die hierbij zijn gebruikt hebben betrekking op de jaren 1960, 1971, 1980, 1990, 2001, 2004 en

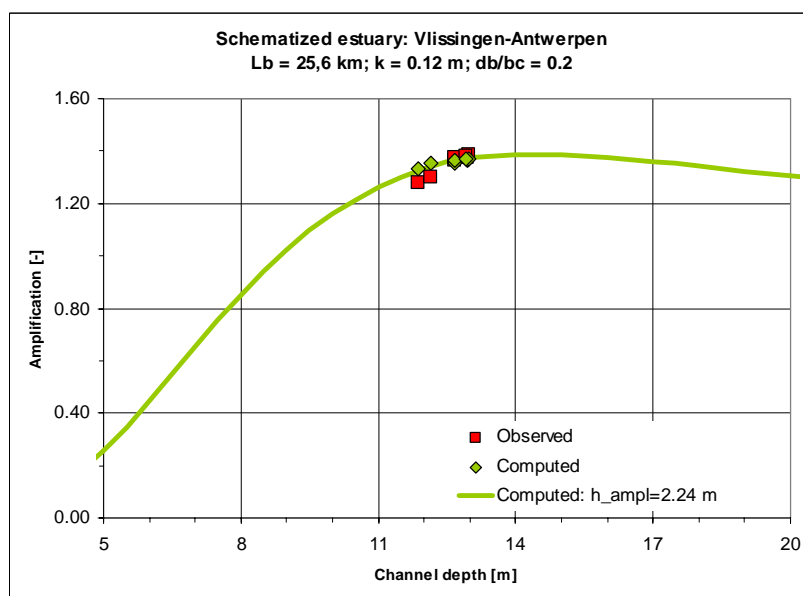
2007. In deze jaren zijn namelijk bodems beschikbaar voor zowel de Westerschelde als de Beneden-Zeeschelde.



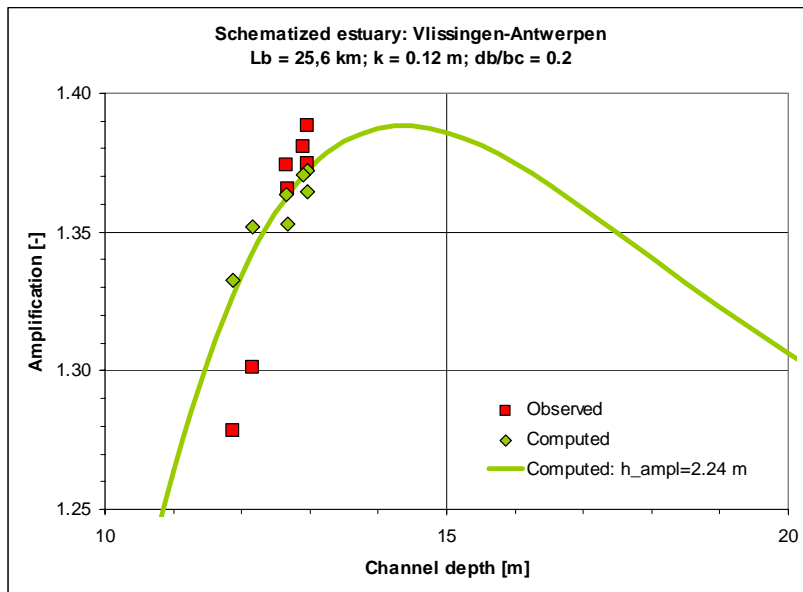
Figuur 3.27: Gemiddelde geuldiepte (links) en relatieve berging (rechts) tussen Vlissingen en Antwerpen.

Figuur 3.27 laat zien, dat de gemiddelde geuldiepte tussen Vlissingen en Antwerpen met 1 meter is toegenomen; de relatieve berging op het intergetijdengebied (excl. Land van Saeftinge en de havenbekkens) is sinds 1960 constant gebleven met een waarde van 0,2.

Figuur 3.28a toont de waargenomen amplificatie van de getijslag in Antwerpen t.o.v. Vlissingen (rode symbolen). De berekende amplificatie is weergegeven met de groene symbolen. De groene lijn geeft het berekende verloop van de amplificatie voor geuldiepten tussen 5 en 20 m. Hierbij is een waarde voor de waterstandsamplitude gebruikt welke gelijk is aan het gemiddelde van de helft van de getijslag in Vlissingen en Antwerpen voor de 7 eerder genoemde jaren (=2,24 m). Figuur 3.28b geeft een detail van Figuur 3.28a.



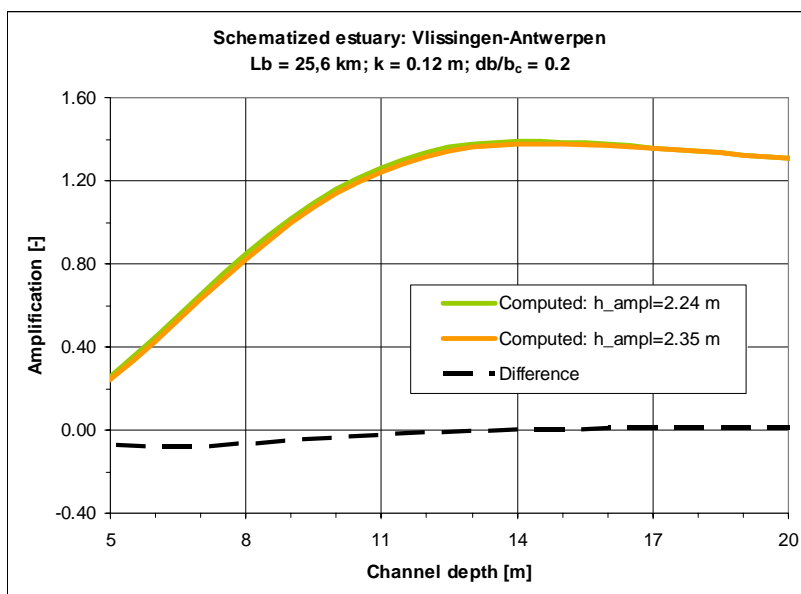
Figuur 3.28a: Amplificatie getijslag in Antwerpen t.o.v. Vlissingen als functie van de geuldiepte. Rode symbolen: observatie; groene symbolen: berekening. Lijn: berekend verloop voor een amplitude van 2,24 m.



Figuur 3.28b: Detail van Figuur 3.28a.

Figuren 3.28a en 3.28b laten zien, dat de waargenomen amplificatie toeneemt met de geuldiepte. Dit wordt eveneens door het model beschreven, al wordt de amplificatie voor de eerste 2 jaren (1960 en 1971) overschat. De groene lijn geeft weer hoe de amplificatie volgens het model eerst nog toeneemt als de geuldiepte groter wordt en voor een geuldiepte groter dan 14-15 m weer afneemt. De maximale *berekende* amplificatie bedraagt bijna 1,39 wat 0,02 groter is dan de huidige waarde. Volgens het analytische model kan de getijslag in Antwerpen daarmee nog 0,1 m toenemen ten gevolge van verdere geulverdieping, uitgaande van een onveranderlijke getijslag in Vlissingen en aannemende dat de parameter  $\Delta b/b_c$  gelijk aan 0,2 blijft. Deze toename is ongeveer gelijk aan de waargenomen toename in Vlissingen gedurende de afgelopen 100 jaar (+3,5% ~ 0,1 m). Of de amplificatie versus geuldiepte het analytische model volgt, dan wel een ander verloop heeft, is niet vast te stellen (door de waarnemingen zou bv. ook een rechte lijn kunnen worden getrokken). Numerieke modelsimulaties zouden hiervoor kunnen worden gebruikt.

Tot slot wordt nagegaan hoe een toename van de getijslag te Vlissingen bij een gegeven, onveranderlijke, bodem van invloed is op de amplificatie te Antwerpen. Figuur 3.29 geeft de amplificatie als functie van de diepte voor een waterstandsamplitude van 2,24 m (zoals getoond in Figuur 3.28a), het verloop voor een amplitude die 5% is vergroot en het verschil tussen beiden.



Figuur 3.29: Amplificatie getijslag in Antwerpen t.o.v. Vlissingen als functie van de geuldiepte. Groene lijn: berekend verloop voor een amplitude van 2,24 m. Oranje lijn: berekend verloop voor een amplitude van 2,35 m. Zwarte lijn: verschil.

Bij een grotere amplitude is de amplificatie kleiner door de grotere energie dissipatie als gevolg van de toegenomen stroomsnelheden. Dit resulteert in een toename van de demping en een afname van de getijslag. Voor de huidige gemiddelde geuldiepte is deze reductie ongeveer 0,01-0,02 en dus klein t.o.v. de waargenomen toename van de amplificatie in Antwerpen ( $\sim 0,2$ ) de afgelopen eeuw.

### 3.5 Hansweert-Schelle

In Par. 3.2 en Par. 3.3 is het analytische model toegepast op afzonderlijke trajecten langs het estuarium. Een traject wordt dan onafhankelijk beschouwd van de rest van het estuarium. De redenen voor deze werkwijze zijn:

- De geometrie en bodemligging kunnen per traject verschillen. Dit vertaalt zich in verschillen voor modelparameters als convergentielengte ( $L_a$ ), bodemruwheid ( $k$ ), geuldiepte ( $h_{ch}$ ) en relatieve berging ( $\Delta b/b_{ch}$ ).
- De historische veranderingen van geuldiepte en relatieve berging zijn verschillend per traject.

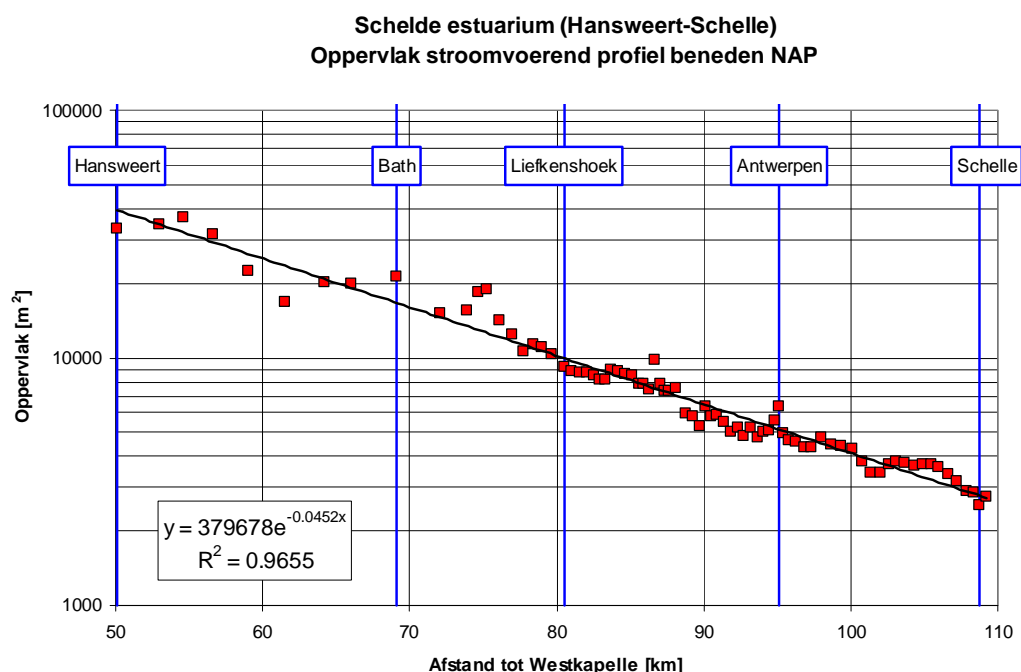
Op deze wijze kunnen met het model historische veranderingen redelijk tot goed worden gereproduceerd. In werkelijkheid zijn er wel interacties tussen de trajecten. Indien bijvoorbeeld de convergentielengte of de waterdiepte langs het estuarium verandert, kunnen reflecties optreden, zoals bij een prismatisch kanaal met verschillende dwarsdoorsneden voor opeenvolgende secties. Het analytische model houdt hiermee geen rekening en veronderstelt dat de modelparameters (convergentielengte, waterdiepte, berging en ruwheid) niet veranderen langs het estuarium.

In deze paragraaf wordt nagegaan in hoeverre het model in staat is de waargenomen amplificatie van de getijslag<sup>8</sup> en de voortplantingssnelheid voor het traject Hansweert-Bath te reproduceren indien het estuarium opwaarts van Hansweert wordt geschematiseerd met één convergentielengte, één waterdiepte, één parameter voor de relatieve berging en één bodemruwheid. Door het estuarium op deze wijze te schematiseren wordt bereikt dat het traject Hansweert-Bath goed “past” bij het aansluitende, bovenstroomse traject. Omdat als onderdeel van deze studie geen bodemgegevens opwaarts van Schelle zijn gemobiliseerd wordt verondersteld dat de genoemde parameters ook van toepassing zijn voor de Boven-Zeeschelde. Het is aannemelijk dat eventuele afwijkingen van de werkelijke situatie opwaarts van Schelle, die aanleiding kunnen geven tot reflecties, van geringe invloed zijn op de modelresultaten voor het traject Hansweert-Bath. Immers, de afstand van Schelle tot Bath is ongeveer 40 km en eventuele reflecties in afwaartse richting zullen snel uitdempen als gevolg van bodemwrijving en het exponentieel verwijden van het estuarium (de dwarsdoorsnede neemt over deze afstand een factor 6 toe bij een convergentielengte van 22 km; zie hierna).

Voor het traject Hansweert-Schelle worden de watervolumes van de geul en boven het intergetijdengebied van de afzonderlijke trajecten (Hansweert-Bath, Bath-Liefkenshoek, Liefkenshoek-Antwerpen en Antwerpen-Schelle, zie Par. 3.2 en 3.3) gesommeerd. Hieruit worden door het model de geuldiepte  $h_{ch}$  en de relatieve berging ( $\Delta b/b_{ch}$ ) berekend. De convergentielengte  $L_a$  volgt uit het verloop van de dwarsdoorsnede langs het estuarium tussen Hansweert en Schelle. De hieruit berekende waarde  $L_a$  bedraagt  $1/0,0452 = 22$  km, zie Figuur 3.30.

---

<sup>8</sup> Conform Par. 3.2 wordt voor de Westerschelde het analytisch model toegepast om de historische verandering van de M2-amplitude te reproduceren. Wanneer in het vervolg van deze paragraaf wordt gesproken over getijslag is dit feitelijk  $2 \cdot M2$ -amplitude.



Figuur 3.30: Stroomvoerend oppervlak tussen Hansweert en Schelle volgens Delft3D (obs.) en exponentiële regressie.

Voor de berekening van de getijslag in Bath en de amplificatie van de getijslag in Bath t.o.v. Hansweert wordt de waargenomen getijslag in Hansweert als randvoorwaarde gebruikt. Bij de terugvoorspelling worden dus eventuele effecten ten gevolge van veranderingen van bv. de geuldiepte opwaarts van Hansweert in de randvoorwaarde meegenomen. De ruwheid  $k$  voor het traject Hansweert-Schelle volgt door kalibratie van het model aan de hand van de waarnemingen. Voor de Nikuradse ruwheid  $k$  volgt een waarde van 0,25 m. Deze waarde is vrij hoog en groter dan die voor de afzonderlijke trajecten (gemiddeld  $k = 0,10$  m). Dit komt overeen met een Chézy-ruwheid van  $49 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$  (bij een gemiddelde geuldiepte van bijna 11 m) en een Manning-waarde van  $0,032 \text{ s/m}^{1/3}$ . De modelinstellingen ( $L_a$  en  $k$ ) blijven ongewijzigd voor de opvolgende jaren, zodat de berekende veranderingen in de getijslag, amplificatie en getijvoortplantingssnelheid tussen Hansweert en Bath alleen het gevolg zijn van veranderingen van de geuldiepte en de berging.

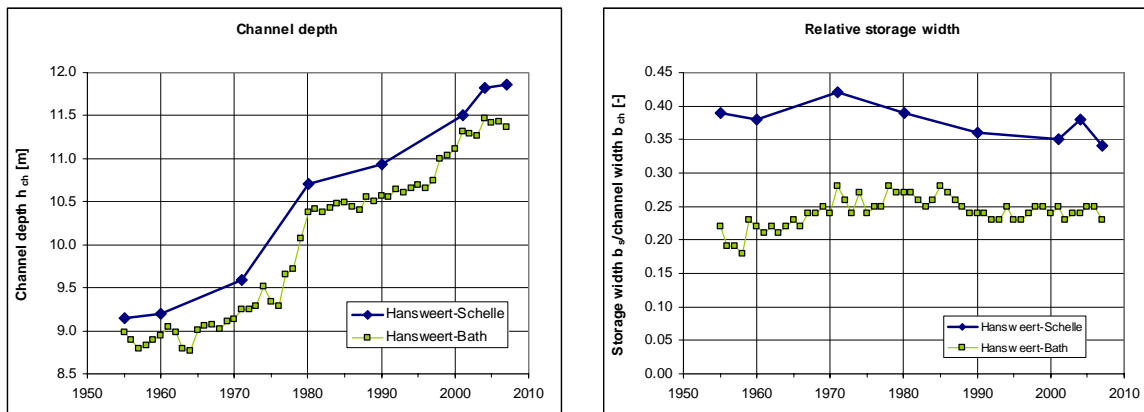
In Tabel 3.5 zijn de modelparameters voor het traject Hansweert-Schelle vermeld.

Tabel 3.5: Modelparameters: sectielengte  $L$ , convergentielengte  $L_a$ , Nikuradse-ruwheid  $k$  en Manning-ruwheid  $n$  voor het traject Hansweert-Schelle.

Traject	$L$ [km]	$L_a$ [km]	$k$ [m]	$n$ [s/m <sup>1/3</sup> ]
Hansweert-Schelle	58,4	22	0,25	0,032

Alleen voor de jaren 1960, 1971, 1980, 1990, 2001, 2004 en 2007 is er zowel een bodem voor de Westerschelde als de Beneden-Zeeschelde beschikbaar. De data zijn aangevuld met die voor het jaar 1955. Deze gegevens zijn wel beschikbaar voor de Westerschelde maar niet voor de Beneden-Zeeschelde. Voor de Beneden-Zeeschelde zijn het watervolume van de geul, het watervolume boven het intergetijdengebied en het oppervlak van de geul verkregen door lineaire interpolatie van de waarden voor de jaren 1950 en 1960.

De gemiddelde geuldiepte en relatieve berging voor het traject Hansweert-Schelle zijn weergegeven in Figuur 3.31. In de figuur is eveneens de gemiddelde geuldiepte en relatieve berging voor het traject Hansweert-Bath vermeld. Tussen Hansweert en Bath is de geul dus gemiddeld 0,5 m ondieper dan tussen Hansweert en Schelle<sup>9</sup>. De relatieve berging tussen Hansweert en Bath bedraagt 0,20-0,25 en tussen Hansweert en Schelle 0,35-0,40.

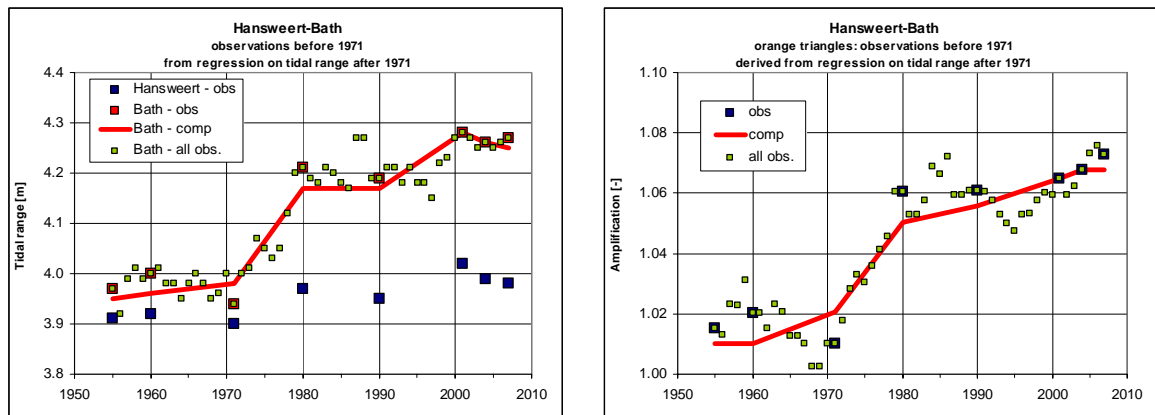


Figuur 3.31: Gemiddelde geuldiepte (links) en relatieve berging (rechts) tussen Hansweert en Schelle (blauwe lijn) en tussen Hansweert en Bath (groene lijn).

In Figuur 3.32 worden in het linker venster de waargenomen getijslag in Hansweert (randvoorwaarde) en Bath en de door het model berekende getijslag in Bath getoond. De amplificatie van de getijslag in Bath ten opzichte van Hansweert is weergegeven in het rechter venster van Figuur 3.32. De *waargenomen* getijslag en amplificatie in Bath worden niet alleen getoond voor de acht beschouwde jaren maar ook voor alle tussenliggende jaren. Voor Bath zijn de jaargemiddelde M2-amplituden alleen beschikbaar sinds 1971. De waarden in de periode vóór 1971 zijn verkregen door een regressie af te leiden tussen de jaargemiddelde M2-amplitude en de getijslag voor de jaren vanaf 1971. Deze regressie is vervolgens gebruikt om voor de jaren vóór 1971 de M2-amplitude te bepalen uit de getijslag voor die jaren. De getoonde 2\*M2-amplitude en de hieruit afgeleide amplificatie voor de observaties in Figuur 3.32 hebben dus voor de jaren 1955 t/m 1970 een onzekerheid.

<sup>9</sup> Dit verschil komt mogelijk (deels) voort uit de wijze van schematisatie. Voor Hansweert-Bath wordt de geuldiepte berekend uit de verhouding tussen het watervolume beneden NAP-2m en het oppervlak van de geul op NAP-2m en vervolgens vermeerderd met een waterschijf van 2m. Voor de Beneden-Zeeschelde wordt het geulvolume en – oppervlak resp. beneden en op TAW (~NAP-2,3m) bepaald en vervolgens vermeerderd met de halve hoogte van het intergetijdengebied (= 6/2 = 3 m; zie LTV V&T-rapport G-6). De geul wordt dus in de Beneden-Zeeschelde aan de bovenzijde begrensd door een niveau dat 0,7 m hoger ligt dan in de Westerschelde.

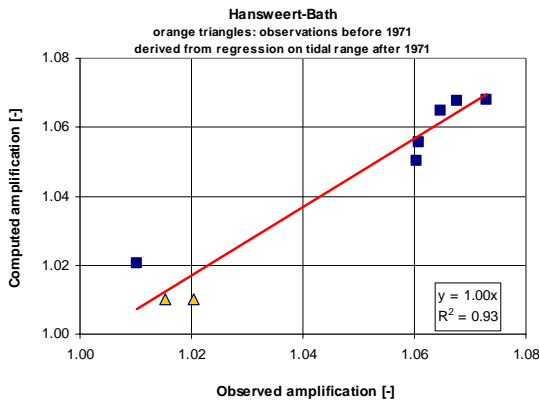




Figuur 3.32: Linker venster: waargenomen getijslag ( $=2 \cdot M_2$ -amplitude) in Hansweert (blauwe symbolen) en Bath (groene symbolen) en berekende getijslag ( $=2 \cdot M_2$ -amplitude) in Bath (rode lijn). Rechter venster: waargenomen (groene symbolen) en berekende amplificatie (rode lijn) in Bath t.o.v. Hansweert. De jaren waarvoor het model is toegepast zijn met grote symbolen weergegeven; deze zijn gebruikt voor de regressie in Figuur 3.33.

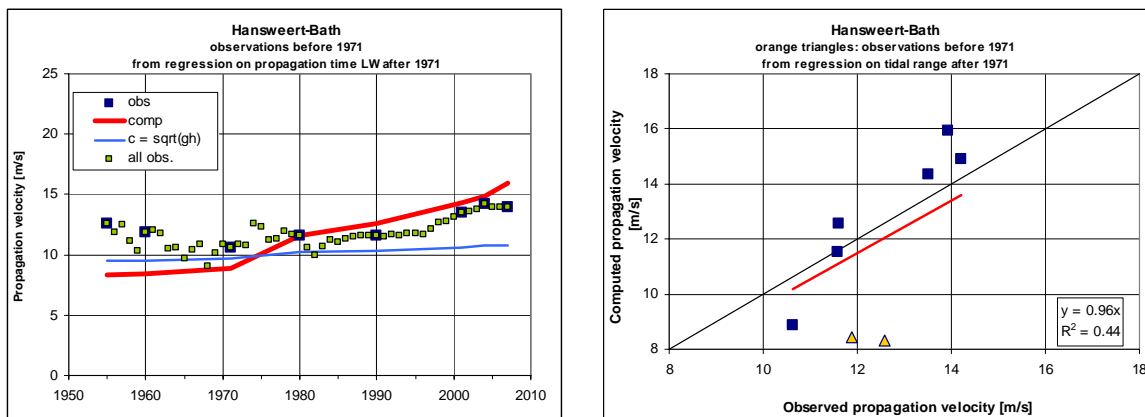
Uit de figuren volgt dat de gebruikte schematisatie voor het traject Hansweert-Schelle met slechts één waarde voor de convergentielengte, één waarde voor de ruwheid, één waarde voor de geuldiepte en één waarde voor de relatieve berging resulteert in een goede reproductie van de getijslag en amplificatie in Bath. Het resultaat is vergelijkbaar met dat voor het traject Hansweert- Bath (Par. 3.2, Figuur 3.6), waarbij alleen de veranderingen van geuldiepte en berging tussen Hansweert en Bath zijn beschouwd. Kennelijk zijn in dit geval de effecten van veranderingen opwaarts van Bath van ondergeschikt belang. Dit geringe effect volgt in feite ook uit de *waargenomen* getijslag in Hansweert die, ondanks de toename van de geuldiepte opwaarts van Hansweert, nauwelijks wordt beïnvloed. De gekalibreerde ruwheid is vrij hoog in vergelijking met de ruwheid in de numerieke 2D- en 3D-modellen. Dit is verklaarbaar, omdat circulaties, die leiden tot energieverliezen en die in de numerieke modellen expliciet worden gemodelleerd, in het analytische model worden verdisconteerd in de ruwheid. Het is niet duidelijk waarom in dit geval met één traject tussen Hansweert en Schelle de gekalibreerde ruwheid groter is dan het gemiddelde van de ruwheden voor de afzonderlijke trajecten.

In Figuur 3.33 wordt de regressie tussen de berekende en waargenomen amplificatie in Bath t.o.v. Hansweert getoond voor de acht beschouwde jaren. De jaren 1955 en 1960, waarvoor de  $M_2$ -amplitude is berekend uit de getijslag zijn weergegeven met de driehoeken.



Figuur 3.33: Regressie tussen berekende en waargenomen amplificatie in Bath t.o.v. Hansweert. Driehoeken: amplificatie op basis van M2-amplitude in 1955 en 1960 zoals volgt uit een regressie met de getijslag (zie tekst).

De waargenomen en berekende getijvoortplantingssnelheid, welke volgt uit het faseverschil van het M2-getij in Hansweert en Bath, zijn weergegeven in het linker venster van Figuur 3.34. In deze figuur worden ook de waarnemingen in de tussengelegen jaren getoond. Vóór 1971 is de M2-fase berekend uit een afgeleide relatie met de looptijd van het laagwater tussen Hansweert en Bath. Dit verband is vastgesteld op basis van de waarnemingen vanaf 1971. In het rechter venster in Figuur 3.34 wordt de berekende versus de waargenomen voortplantingssnelheid getoond.

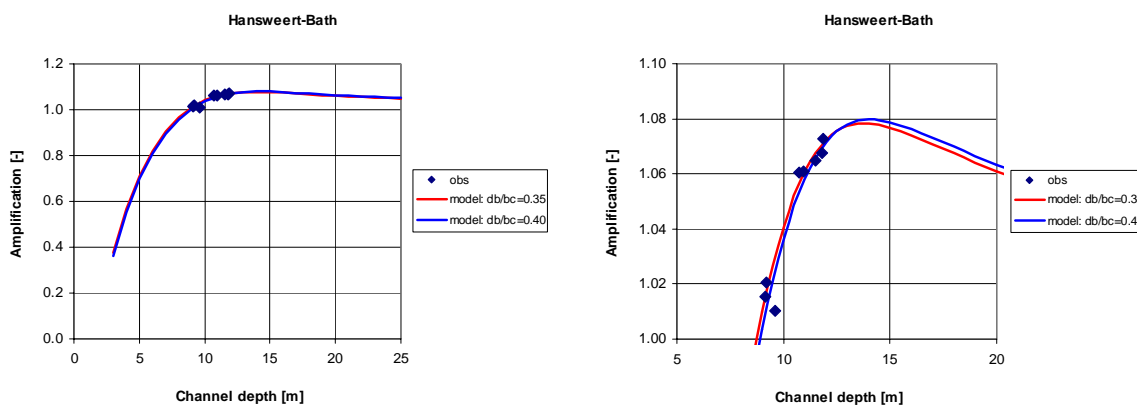


Figuur 3.34: Linker venster: waargenomen (groene symbolen) en berekende (rode lijn) getijvoortplantingssnelheid voor het traject Hansweert-Bath. Rechter venster: regressie tussen waargenomen en berekende getijvoortplantingssnelheid. De waarnemingen vóór 1971 (zie driehoeken) zijn berekend uit een relatie tussen de voortplantingssnelheid en de looptijd van laagwater op basis van waarnemingen vanaf 1971.

De getijvoortplantingssnelheid wordt door het model iets overschat maar de toename sinds 1980 wordt wel gereproduceerd. De waarnemingen voorafgaand aan 1971 zijn minder betrouwbaar aangezien zij niet volgen uit metingen maar indirect zijn afgeleid. Dit laatste volgt ook uit het rechter venster van Figuur 3.34 waar de jaren 1955 en 1960 (driehoeken) afwijken van de overige datapunten.

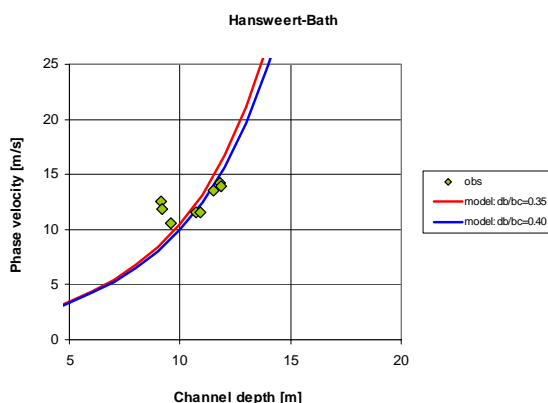
Tenslotte wordt in Figuur 3.35 de amplificatie als functie van de geuldiepte getoond en in Figuur 3.36 de getijvoortplantingssnelheid als functie van de geuldiepte. De symbolen

betreffen de waarnemingen; de getrokken lijnen (voor  $\Delta b/b_{ch}=0,35$  en  $0,40$ ; zie Figuur 3.31) zijn met het model berekend.



Figuur 3.35: Amplificatie Bath t.o.v. Hansweert als functie van de geuldiepte. Rechter venster is detail van linker venster. Symbolen: waarnemingen. Lijnen: model.

Evenals eerder werd gevonden (Figuur 3.7, Par. 3.2) volgen de waarnemingen het door het model berekende verband. De maximale amplificatie is iets lager dan in Par. 3.2 (1,08 i.p.v. 1,09) en deze wordt bereikt bij een gemiddelde geuldiepte tussen Hansweert en Bath van ongeveer 14 m voor  $\Delta b/b_{ch} = 0,35-0,40$ .



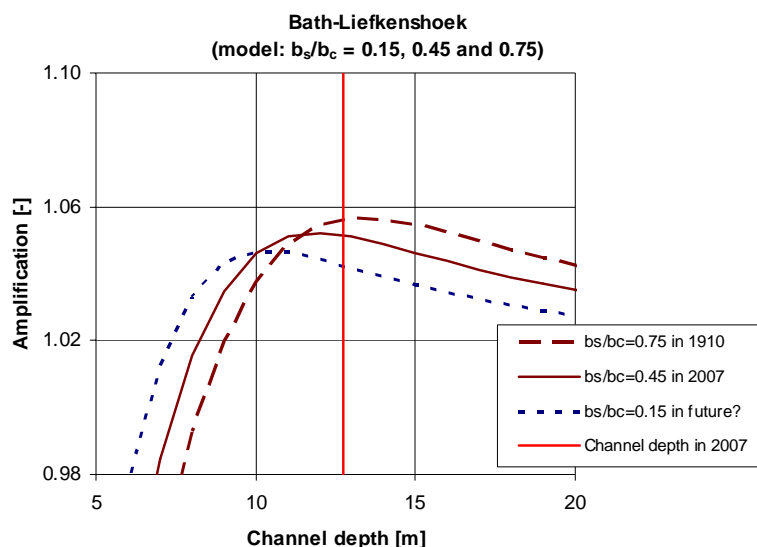
Figuur 3.36: Getijvoortplantingssnelheid tussen Hansweert en Bath als functie van de geuldiepte. Symbolen: waarnemingen. Lijnen: model.

Volgens het model zal bij verdere verdieping van de geul tussen Hansweert en Bath de voortplantingssnelheid sterk toenemen (Figuur 3.36). Bij een verdieping van de geul tot 14 m verdubbelt deze t.o.v. de huidige situatie en zal de looptijd van het getij tussen Hansweert en Bath halveren.

### 3.6 Conclusies

1. Met het analytische model voor getijvoortplanting kan de verandering van de amplificatie van de getijslag over het traject Bath-Liefkenshoek en, in iets mindere mate, over het traject Antwerpen-Schelle worden gereproduceerd. Voor het traject Liefkenshoek-Antwerpen kunnen de waargenomen veranderingen niet goed met het model worden gereproduceerd. De oorzaak hiervan is onbekend. Een mogelijke verklaring vormt het onderverdelen van het estuarium in trajecten met verschillende

- convergentielengte, ruwheid en geuldiepte, waardoor reflecties kunnen optreden. Deze reflecties worden niet door het analytische model beschreven.
- Volgens het model is de amplificatie van de getijslag tussen Bath en Liefkenshoek momenteel maximaal. Verdere verdieping van de geul zal dan leiden tot een (geringe) afname van de getijslag. Tussen Antwerpen en Schelle zal een verdieping van de geul nog wel resulteren in een verdere toename van de getijslag.
  - Een hypothetische, substantiële afname van de waterberging op het intergetijdengebied tussen Bath en Liefkenshoek (in dezelfde mate als deze de laatste eeuw was afgenomen) zou bij de huidige geuldiepte (d.d. 2007) *volgens het analytische model* leiden tot een afname van de amplificatie, zie Figuur 3.37. Dit effect druist in tegen het algemene beeld dat een afname van de berging, bv. ten gevolge van een inpoldering, resulteert in een toename van de amplificatie. In hoeverre deze voorspelling door het model bij grote geuldiepten juist is kan worden onderzocht met een numeriek model (bv. 1D). Hierbij kan ook worden onderzocht of de veronderstelling, dat de getijslag ter plaatse van de afwaartse rand (Bath) niet wordt beïnvloed door de afgenomen berging, juist is.



Figuur 3.37: Berekende amplificatie als functie van de geuldiepte voor  $\Delta b/b_{ch} = 0,75, 0,45$  en  $0,15$ .

- De getijvoortplantingssnelheid wordt door het model voor de trajecten Bath-Liefkenshoek en Antwerpen-Schelle overschat. Tussen Liefkenshoek en Antwerpen wordt deze goed gereproduceerd. De reproductie van de getijvoortplantingssnelheid is mogelijk beter als voor de observaties gebruik wordt gemaakt van de M2-fase. Deze gegevens zijn voor de Beneden-Zeeschelde echter niet beschikbaar.
- Het model beschrijft de waargenomen amplificatie in Antwerpen t.o.v. Vlissingen goed. Volgens het model wordt bij een gemiddelde geuldiepte tussen Vlissingen en Hansweert van 14-15 m (d.i. een toename van 1 tot 2 m t.o.v. de huidige situatie) een maximale amplificatie bereikt die 0,02 groter is dan de huidige berekende amplificatie. Dit komt overeen met een nog mogelijke toename van de getijslag in Antwerpen (ten gevolge van een grotere waterdiepte) van orde 0,1 m, aannemend dat de waterberging op het intergetijdengebied, de convergentielengte en het getij in Vlissingen niet veranderen.
- Een toename van de *getijslag* in Vlissingen leidt tot een afname van de *amplificatie* in Antwerpen (maar waarschijnlijk wel met een grotere getijslag vanwege de verandering in randvoorwaarde bij Vlissingen). Bij de huidige waterdiepte is deze

afname in amplificatie klein (0,01-0,02), als de getijslag 5% groter wordt (gelijk aan de toename gedurende de afgelopen 100 jaar).



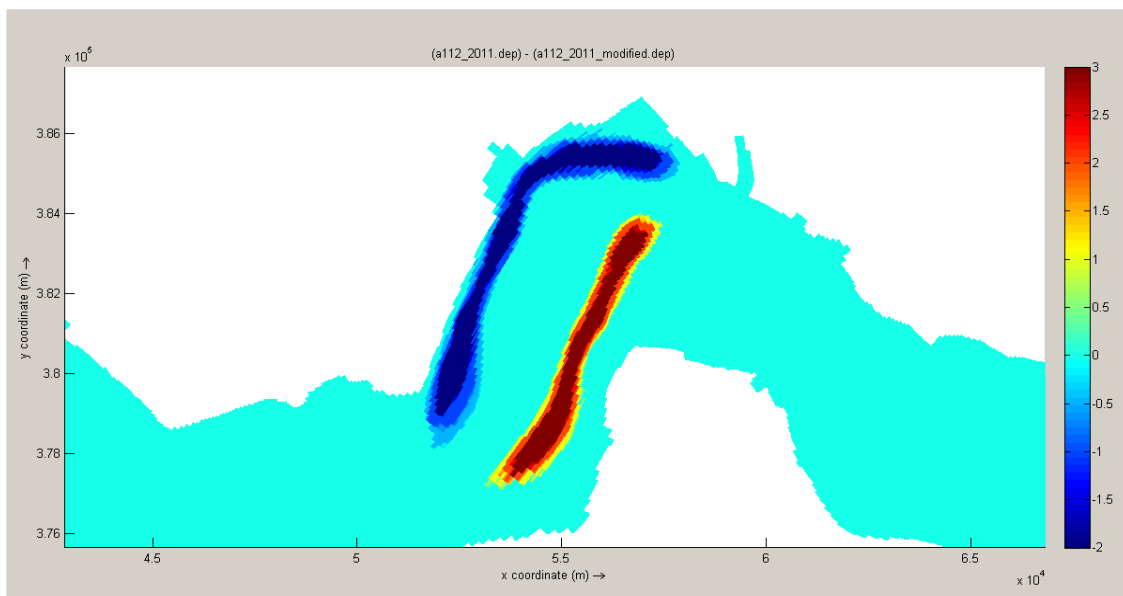
## 4 Toepassing analytisch model voor ingrepen

Na de kalibratie van het analytische model voor de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde is het model voor een aantal ingrepen toegepast en vergeleken met de resultaten van andere modellen. Het doel hiervan is om gevoel te krijgen voor de potenties van het model, bijvoorbeeld voor het geven van eerste-orde schattingen, en voor het verkrijgen van inzicht.

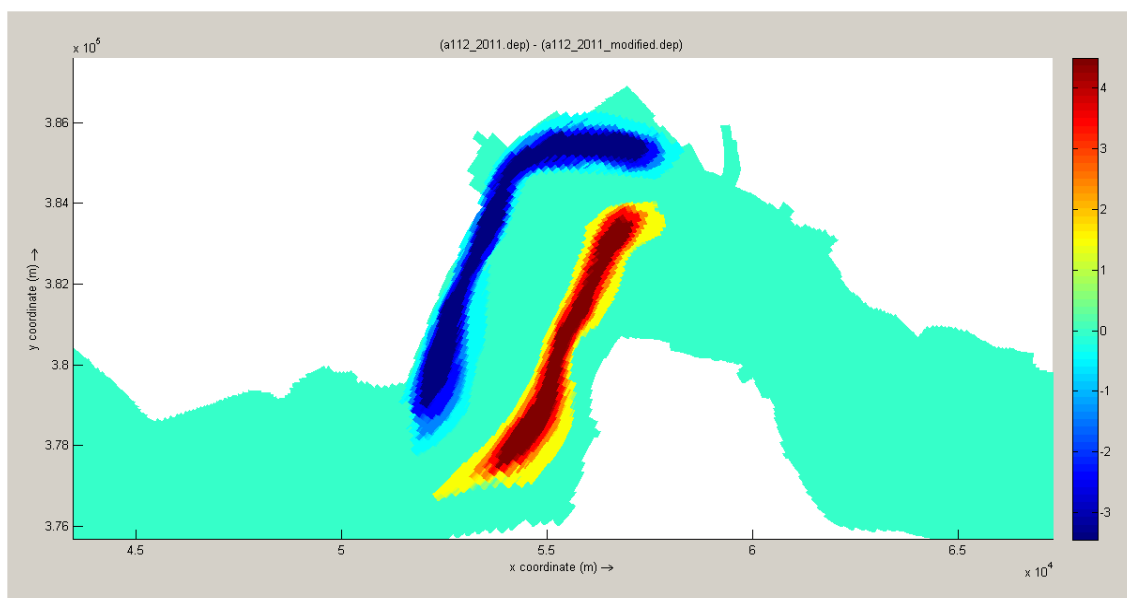
### 4.1 Bodemveranderingen in macrocel 4 (Gat van Ossenisse en Middelgat)

#### 4.1.1 Schematisatie

In LTV V&T-rapport G-4 worden de effecten van morfologische veranderingen in macrocel 4 op getij en zandtransport beschreven. Hierbij is met afzonderlijke Delft3D simulaties het watervolume van het Middelgat verkleind met resp. 12 en 25  $\text{Mm}^3$  en het watervolume van het Gat van Ossenisse vergroot met resp. 12 en 25  $\text{Mm}^3$ . Ook zijn de effecten van combinaties onderzocht, namelijk een afname van het watervolume van het Middelgat met 12  $\text{Mm}^3$  (25  $\text{Mm}^3$ ) gecombineerd met een toename van het watervolume van het Gat van Ossenisse met 12  $\text{Mm}^3$  (25  $\text{Mm}^3$ ). De locaties van de bodemveranderingen in Middelgat en Gat van Ossenisse zijn weergegeven in Figuur 4.1a (12  $\text{Mm}^3$ ) en Figuur 4.1b (25  $\text{Mm}^3$ ) (LTV V&T-rapport G-4).

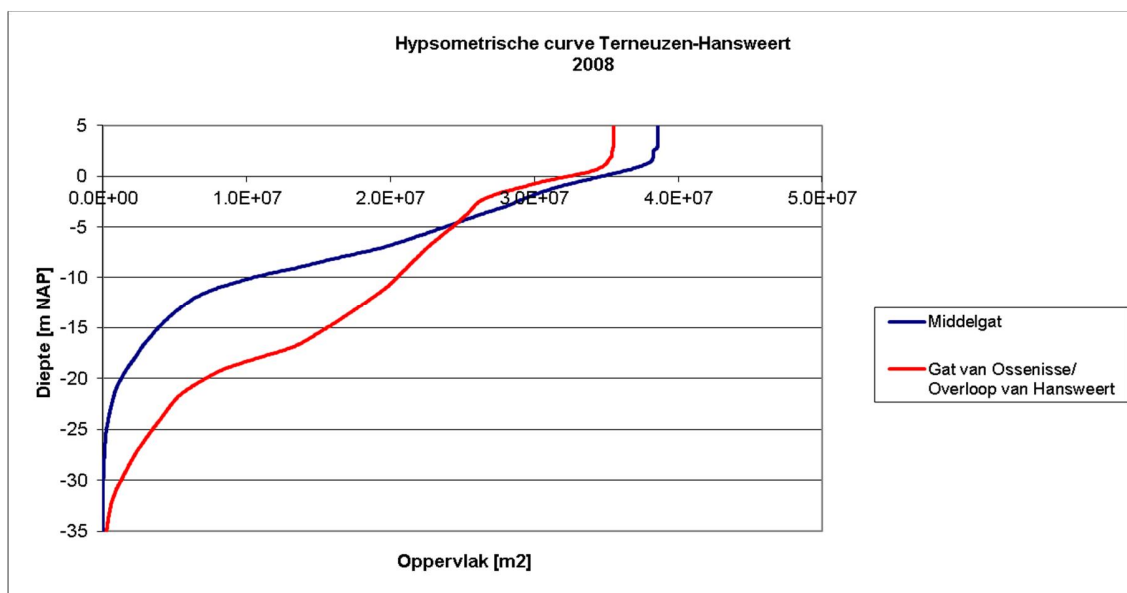


Figuur 4.1a: Bodemdiepteverschillen in Gat van Ossenisse en Middelgat bij volumeveranderingen van 12  $\text{Mm}^3$  (LTV V&T-rapport G-4). Rood is toename diepte en blauw is afname diepte.



Figuur 4.1b: Bodemdiepteverschillen in Gat van Ossensisse en Middelgat bij volumeveranderingen van  $25 \text{ Mm}^3$  (LTV V&T-rapport G-4). Rood is toename diepte en blauw is afname diepte.

De hypsometrische curven van beide geulen worden getoond in Figuur 4.2.



Figuur 4.2: Hypsometrische curven Gat van Ossensisse/Overloop van Hansweert en Middelgat in 2008.

De resultaten van de Delft3D-simulaties (NEVLA-schematisatie) worden hierna vergeleken met de resultaten van het analytische model. Het betreft de effecten op de amplificatie van



het getij tussen Terneuzen en Hansweert en de effecten op de getijvoortplantingssnelheid over het traject Terneuzen-Hansweert.

De parameters, die de geometrie van het traject Terneuzen-Hansweert beschrijven, zijn weergegeven in Tabel 4.1.

Tabel 4.1: Geometrische parameters traject Terneuzen-Hansweert.

<b>Geometrische en bodemparameters</b>		
Stroomvoerend oppervlak geul t.p.v. Terneuzen [m <sup>2</sup> ] (zie Fig. 3.9a)	$A_{ch}$	~ 60.000
Convergentielengte [m]	$L_a$	33.000
Sectielengte [m]	$L$	18.000
Bodemruwheid (Nikuradse) [m]	$k$	0,08
Geulvolume beneden NAP [m <sup>3</sup> ]	$W_{vol}$	$7,23 \cdot 10^8$
Geuloppervlakte op NAP-2m [m <sup>2</sup> ]	$A_{ch}$	$5,94 \cdot 10^7$
<b>Afgeleide parameters</b>		
Geuldiepte [m]	$h_{ch}$	12,2
Geulbreedte t.p.v. afwaartse rand (Terneuzen)	$B_T$	~ 5.000

Het watervolume van de geul is afgeleid uit de hypsometrische curve van de bodem tussen Terneuzen en Hansweert voor het jaar 2008 en betreft het volume beneden NAP-2m vermeerderd met een waterschijf ter grootte van het horizontaal oppervlak van de geul op NAP-2m maal de dikte van de waterschijf (= 2 m). De geuldiepte volgt dan uit de verhouding tussen dit watervolume en het geuloppervlak op NAP-2m (voor de wijze van schematisatie, zie LTV V&T-rapport G-5). Het horizontaal geuloppervlak tussen Terneuzen en Hansweert volgt na integratie van de exponentieel variërende geulbreedte  $B_{ch}$ :

$$A_{ch} = B_T L_b \left[ 1 - e^{-L/L_b} \right] \quad (4.1)$$

De volumeveranderingen van 12 en 25 Mm<sup>3</sup> van Gat van Ossensisse en Middelgat leiden tot de volgende gemiddelde geuldiepten tussen Terneuzen en Hansweert:

Tabel 4.2: Veranderingen geuldiepte voor totale dwarsprofiel tussen Terneuzen en Hansweert.

<b>Situatie</b>	<b>Verandering geuldiepte [m]</b>	<b>Geuldiepte [m]</b>
Referentie	-	12,20
Gat van Ossensisse+12 Mm <sup>3</sup>	+0,17	12,37
Gat van Ossensisse+25 Mm <sup>3</sup>	+0,36	12,56
Middelgat -12 Mm <sup>3</sup>	-0,17	12,03
Middelgat -25 Mm <sup>3</sup>	-0,36	11,84

Uit Tabel 4.2 volgt, dat de gemiddelde aangebrachte bodemveranderingen, verdeeld over het gehele geuloppervlak, beperkt zijn (0.17-0.36 m).

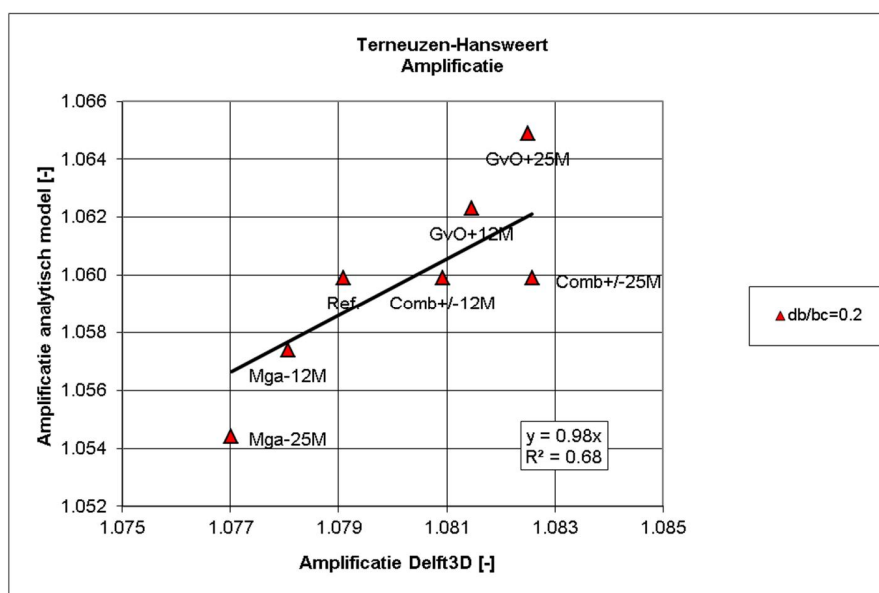
In het analytische model wordt bij de schematisatie geen onderscheid gemaakt tussen de beide geulen (Gat van Ossensisse en Middelgat): een volumeverandering van één van de

geulen heeft betrekking op de volledige dwarsdoorsnede en de bodemverandering is uniform over het gehele oppervlak van de geul. Dit betekent ook, dat bij de gecombineerde ingrepen een volumetoename van het Gat van Ossensisse wordt gecompenseerd door een even grote volumeafname van het Middelgat. Volgens het analytische model zal er dan geen effect zijn op de getijvoortplanting omdat de netto bodemverandering nul is.

De simulaties met het analytische model zijn uitgevoerd met een verhouding van de bergende breedte  $\Delta b$  en de geulbreedte  $b_{ch}$  gelijk aan 0,2 (zie Figuur 3.3).

#### 4.1.2 Resultaten

In Figuur 4.3 wordt de amplificatie van de M2-amplitude tussen Terneuzen en Hansweert, zoals voor de 7 simulaties berekend met het analytische model, vergeleken met de amplificatie volgens Delft3D.



Figuur 4.3: Amplificatie M2-amplitude Terneuzen - Hansweert. Vergelijking analytisch model met Delft3D.

Het analytische model is redelijk in staat de door Delft3D berekende veranderingen van de amplificatie van de getijslag in Hansweert t.o.v. Terneuzen te reproduceren. De regressielijn heeft bijna een helling van één<sup>10</sup> met  $r^2 = 0,68$ . De door het analytische model berekende amplificatie is ongeveer 0,02 kleiner dan die volgens Delft3D. De door Delft3D berekende effecten van de bodemverdiepingen (Gat van Ossensisse) zijn groter dan die van de bodemverondiepingen (Middelgat). Daardoor resulteren de gecombineerde ingrepen (met een netto volumeverandering van nul m<sup>3</sup>) toch tot een toename van de amplificatie. Een aannemelijke verklaring is dat het getijvolume van het Gat van Ossensisse bijna tweemaal groter is dan die van het Middelgat (zie LTV V&T-rapport G-5). Ingrepen in het Gat van

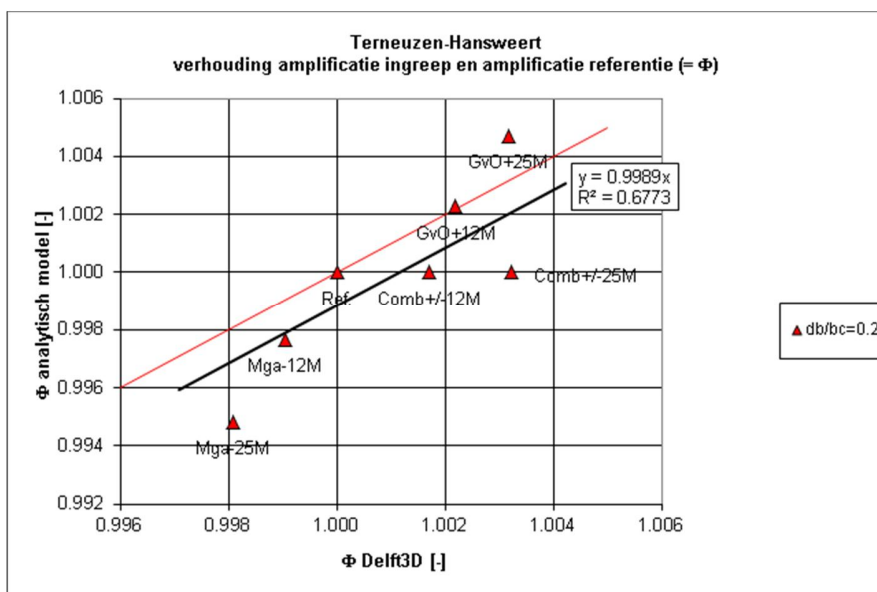
<sup>10</sup> Omdat het intercept van de regressielijn nul is en de datapunten dicht bij het punt (1, 1) liggen wordt 'automatisch' een regressielijn volgens  $y=x$  gevonden.

Ossenisie hebben daardoor mogelijk een groter effect op het getij. Het analytische model maakt gebruik van de totale volumeverandering tussen Terneuzen en Hansweert. Het netto resultaat van een verdieping van het Gat van Ossenisie en een verondieping van het Middelgat is nul en daardoor wordt geen effect op het getij berekend. De 1D-schematisatie is hier een duidelijke beperking van het analytische model<sup>11</sup>.

Bovenstaand zijn de beide modellen, analytisch en Delft3D, in absolute zin met elkaar vergeleken. Voor het vaststellen van effecten van ingrepen worden modellen vaak in relatieve zin gebruikt. Het relatieve effect op de amplificatie van een ingreep wordt gedefinieerd als:

$$\Phi = \frac{\text{amplificatie}_{\text{ingreep}}}{\text{amplificatie}_{\text{referentie}}} \quad (4.2)$$

Figuur 4.4 vergelijkt  $\Phi$  volgens het analytische model met  $\Phi$  volgens Delft3D.

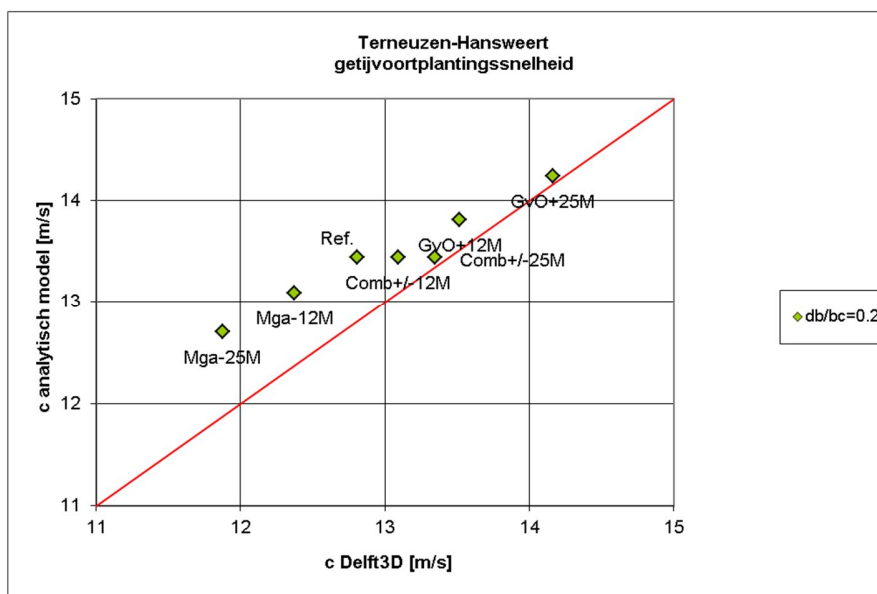


Figuur 4.4: Relatieve amplificatie M2-amplitude ( $\Phi$ ) tussen Terneuzen en Hansweert. Vergelijking analytisch model met Delft3D.  $\Phi$  is gedefinieerd met vgl. (4.2). Rode lijn = 1:1; zwarte lijn is regressie.

Het relatieve effect op de amplificatie wordt gemiddeld door het analytische model iets onderschat.

<sup>11</sup> Aparte berekeningen met het analytische model voor beide geulen en samenstelling van het resultaat per geul gaven geen verbetering en worden hier niet getoond. De convergentielengte is hierbij voor beide geulen gelijk gehouden aan 33 km. Mogelijk moet dan de convergentielengte per geul worden bepaald maar in dat geval is het eindresultaat te gevoelig voor de gekozen schematisatie.

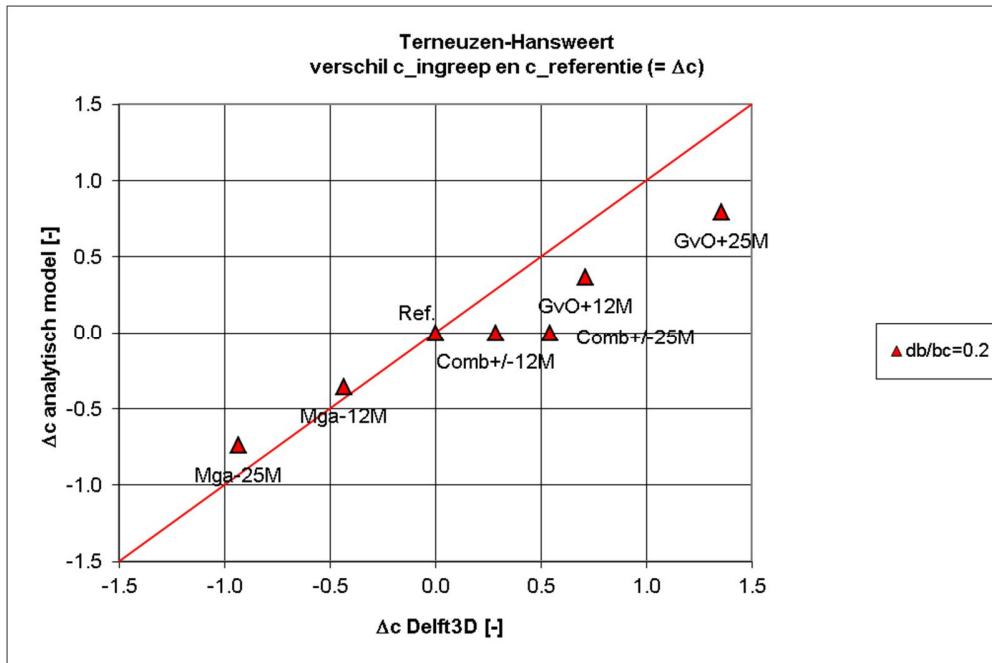
De effecten van de ingrepen op de getijvoortplantingssnelheid worden getoond in Figuur 4.5. De getijvoortplantingssnelheid is berekend uit het faseverschil tussen Hansweert en Terneuzen en de afstand tussen beide meetpunten.



Figuur 4.5: Getijvoortplantingssnelheid volgens M2-fase tussen Terneuzen en Hansweert. Vergelijking analytisch model met Delft3D.

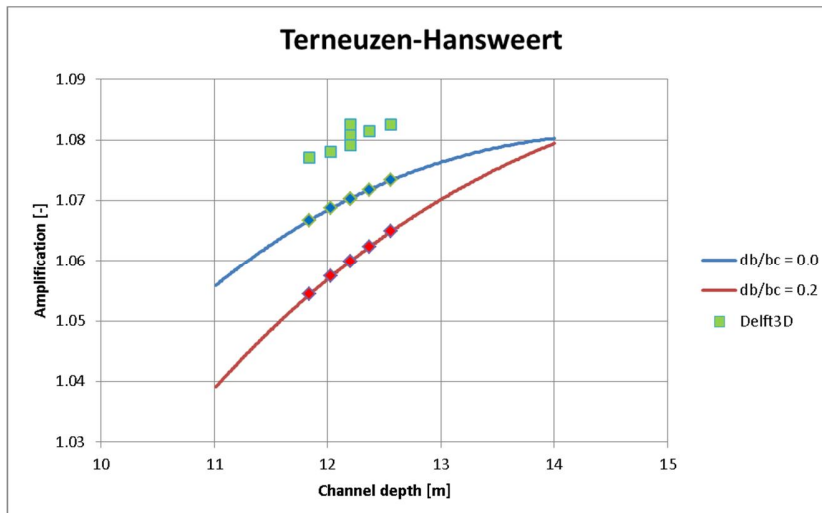
De effecten van de ingrepen op de getijvoortplantingssnelheid worden door het analytische model ( $\sim 1$  m/s) goed weergegeven in vergelijking met de resultaten volgens Delft3D. In Figuur 4.6 worden de verschillen ( $\Delta c$ ) t.o.v. de referentie getoond met:

$$\Delta c = c_{ingreep} - c_{referentie} \quad (4.3)$$



Figuur 4.6: Relatieve getijvoortplantingssnelheid tussen Terneuzen en Hansweert. Vergelijking analytisch model met Delft3D.

Tenslotte wordt in Figuur 4.7 de amplificatie van de M2-amplitude als functie van de geuldiepte getoond voor zowel het analytische model als Delft3D. Hieruit blijkt, dat het analytische model de amplificatie 0,01 (voor  $\Delta b/b_c = 0,0$ ) tot 0,02 (voor  $\Delta b/b_c = 0,2$ ) onderschat. De toename als functie van de geuldiepte wordt wel redelijk (voor  $\Delta b/b_c = 0,2$ ) tot goed (voor  $\Delta b/b_c = 0,0$ ) gereproduceerd.



Figuur 4.7: Amplificatie M2-amplitude als functie van de geuldiepte. Analytisch model ( $\Delta b/b_c = 0,0$  en  $0,2$ ) en Delft3D.

#### 4.1.3 Conclusies

Geconcludeerd wordt, dat met het analytische model de eerste orde effecten van de bodemveranderingen op de amplificatie van de M2-amplitude en de M2-getijvoortplantingsnelheid goed kunnen worden voorspeld. De amplificatie tussen Terneuzen en Hansweert wordt door het analytische model onderschat, maar de relatieve effecten t.o.v. de referentie worden goed gereproduceerd. De effecten op de getijvoortplantingssnelheid worden door het analytische model, qua absolute grootte en verschillen t.o.v. de referentie, goed weergegeven. Verschillen tussen het analytische model en Delft3D komen (naast de intrinsieke aannamen van het analytische model) voort uit de schematisatie van (i) de geometrie (exponentieel variërende breedte met een constante geuldiepte, benadering van de hypsometrische curve door een “bakprofiel”) en (ii) de gepleegde bodemveranderingen (gelijkmatig verdeeld over het gehele oppervlak van de geul). Het analytische model is toegepast voor een traject langs de Westerschelde dat geïsoleerd wordt beschouwd van de overige trajecten. Eventuele reflecties die het gevolg kunnen zijn van variërende geometrische parameters langs het estuarium (bv. convergentielengte, ruwheid en geuldiepte) worden verwaarloosd. Verder is verondersteld, dat de afwaartse rand (Terneuzen) niet wordt beïnvloed door de ingrepen.

De Delft3D simulaties laten zien dat de effecten van de verruiming van het Gat van Ossensisse op de amplificatie en de getijvoortplantingssnelheid groter zijn dan de effecten van de verondiepingen van het Middelgat. Mogelijk is dit het gevolg van het feit dat het getijvolume van het Gat van Ossensisse bijna tweemaal groter is dan het getijvolume van het Middelgat. Ingrepen in deze geul kunnen daardoor van grotere invloed zijn op het getij dan ingrepen in het Middelgat. Bij de gecombineerde ingrepen is het effect van de verdieping van het Gat van Ossensisse bepalend, zodat de amplificatie toeneemt ondanks het feit dat de netto volumeverandering tussen Terneuzen en Hansweert nul is. Met het analytische model

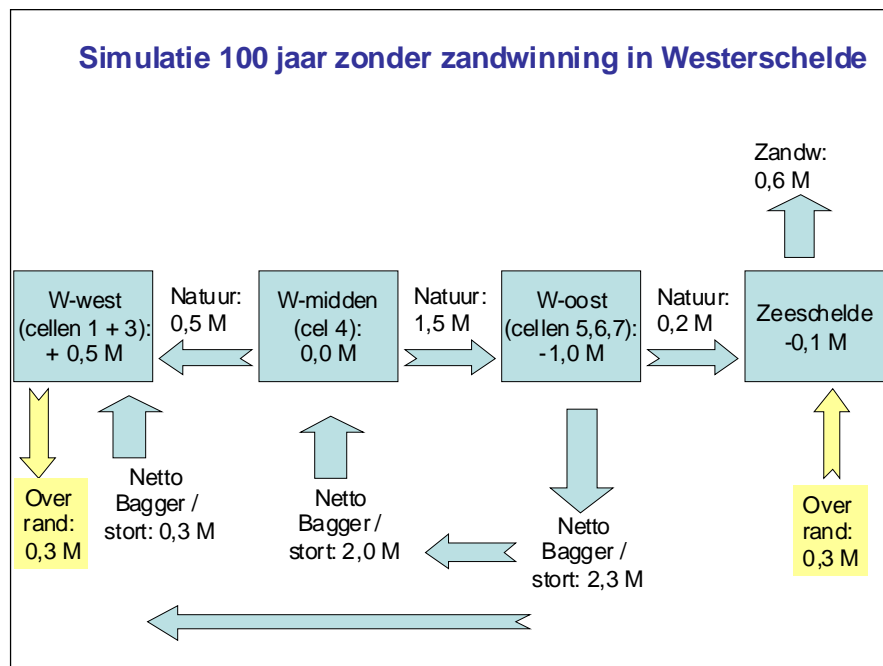


kan dit verschil tussen de geulen niet worden aangegeven, omdat bij de schematisatie wordt uitgegaan van een één-geul systeem.

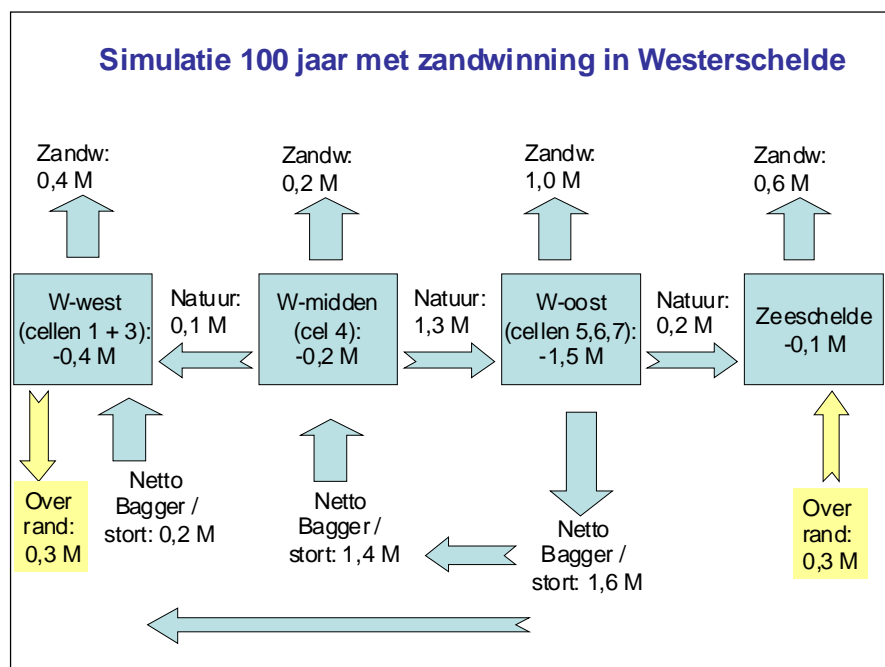
## 4.2 Zandwinning

### 4.2.1 Schematisatie

Met Finel2d zijn lange-termijn morfologische simulaties uitgevoerd om de effecten van zandwinning te analyseren. De simulaties zonder en met zandwinning in de Westerschelde (gemiddeld  $1,6 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$ ) zijn elk uitgevoerd over een periode van 100 jaar. De zandwinning in de Beneden-Zeeschelde bedroeg gemiddeld  $0,6 \text{ Mm}^3/\text{jaar}$  bij beide simulaties. Tijdens de simulaties wordt het baggervolume uitgerekend en het gebaggerde zand elders in het estuarium gestort. Voor deze analyse zijn de netto volumeveranderingen van belang die het gevolg zijn van (i) de zandwinning, (ii) het baggeren en storten (mede beïnvloed door al dan niet zand te winnen) en (iii) de natuurlijke morfologische veranderingen (mede beïnvloed door wel of geen zandwinning). De effecten van de netto volumeveranderingen op het getij worden nagegaan voor de trajecten Vlissingen-Terneuzen (= W-west), Terneuzen-Hansweert (= W-midden) en Hansweert-Bath (= W-oost). De zandbalansen voor de beide situaties zijn weergegeven in Figuur 4.8a (zonder zandwinning Westerschelde) en Figuur 4.8b (met zandwinning Westerschelde).



Figuur 4.8a: Gemiddelde jaarlijkse transporten en volumeveranderingen (zonder zandwinning in de Westerschelde; wel zandwinning in de Zeeschelde)



Figuur 4.8b: Gemiddelde jaarlijkse transporten en volumeveranderingen met zandwinning in zowel Westerschelde als Zeeschelde.

Uit Figuren 4.8a en 4.8b volgen de volgende netto volumeveranderingen per traject langs de Westerschelde, zie Tabel 4.3.

Tabel 4.3: Watervolumeveranderingen van de geulen voor de situaties zonder en met zandwinning.

Traject	Zonder zandwinning [Mm <sup>3</sup> ]	Met Zandwinning [Mm <sup>3</sup> ]	Verandering t.g.v. zandwinning [Mm <sup>3</sup> ]
Vlissingen-Terneuzen	-50	+40	+90
Terneuzen-Hansweert	0	+20	+20
Hansweert-Bath	+100	+150	+50
Totaal	+50	+210	+160

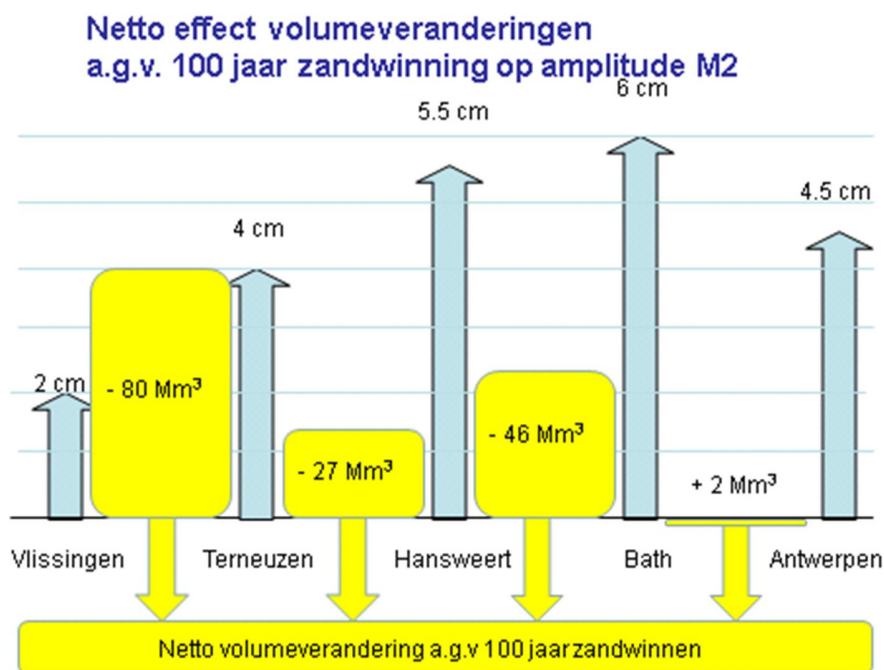
De volumeveranderingen betreffen het *watervolume* en worden verondersteld betrekking te hebben op het volume van de geulen en dus niet van het intergetijdengebied. Het geuloppervlak verschilt per traject (afnemend in opwaartse richting). De gemiddelde veranderingen van de geuldiepten zijn weergegeven in Tabel 4.4. De geuloppervlakten per traject voor het jaar 2006 zijn ontleend aan het LTV V&T-rapport G-5.

Tabel 4.4: Gemiddelde veranderingen geuldiepten gedurende simulatieperiode van 100 jaar voor de situaties zonder en met zandwinning.

Traject	Zonder zandwinning [m]	Met Zandwinning [m]	Verandering t.g.v. zandwinning [m]
Vlissingen-Terneuzen	-0,54	+0,43	+0,97
Terneuzen-Hansweert	0,0	+0,33	+0,33
Hansweert-Bath	+2,70	4,05	+1,35

#### 4.2.2 Resultaten

De door Finel2D berekende veranderingen van de M2-amplitude zijn weergegeven in Figuur 4.9. In deze figuur worden ook de netto *zandvolume*veranderingen getoond<sup>12</sup>. Deze verschillen iets van de volumeveranderingen in Tabel 4.3 (rechterkolom), omdat deze laatste zijn gebaseerd op de afgeronde waarden in de Figuren 4.8a en 4.8b.



Figuur 4.9: Veranderingen M2-amplitude a.g.v. 100 jaar zandwinning (pers. comm. Gerard Dam).

Uit Tabel 4.4 volgt, dat tussen Hansweert en Bath de toename van de geuldiepte als gevolg van zandwinning 40% groter is dan de toename van de geuldiepte tussen Vlissingen en Terneuzen (1,35 vs. 0,97 m). De toename van de M2-amplitude is echter slechts 0,5 cm terwijl de toename tussen Vlissingen en Terneuzen 2 cm bedraagt. Voor het traject Terneuzen-Hansweert geldt, dat de M2-amplitude met 1,5 cm toeneemt bij een toename van

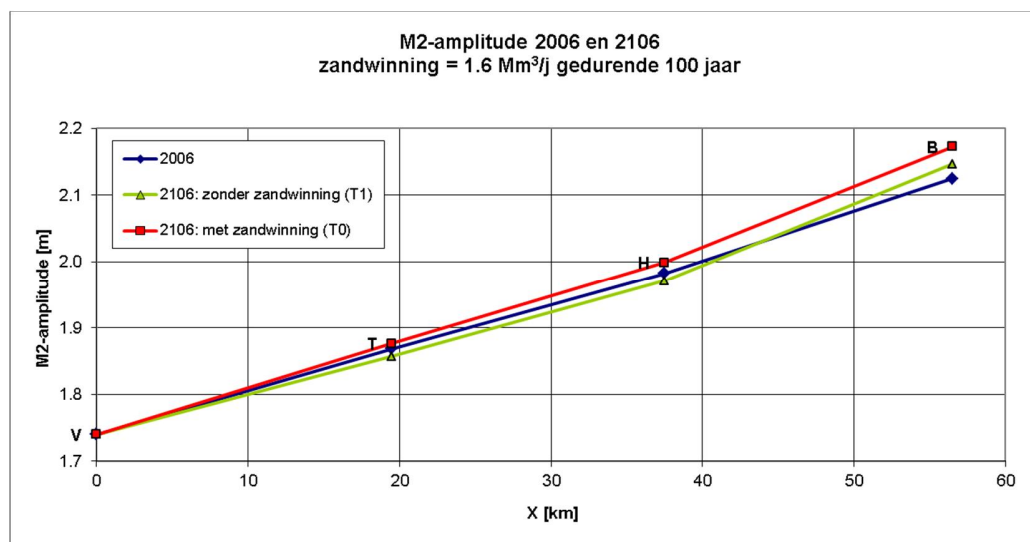
<sup>12</sup> De zandvolumeveranderingen verschillen qua teken van de watervolumeveranderingen. Een afname van het zandvolume betekent een even grote toename van het watervolume.

de geuldiepte van 0,33 m. Deze toename is daarmee driemaal groter dan voor het traject Hansweert-Bath (= 0,5 cm), terwijl de toename van de geuldiepte viermaal kleiner is (0,33 m vs. 1,35 m). De M2-amplitude voor het traject Hansweert-Bath is dus relatief ongevoelig voor diepteveranderingen van de geul<sup>13</sup>.

Voor de analyse met het analytische model wordt het volgende verondersteld:

- De effecten van de diepteveranderingen op de M2-amplitude mogen geïsoleerd voor de afzonderlijke trajecten worden bekeken. M.a.w. reflecties die het gevolg kunnen zijn van veranderingen in convergentielengte, ruwheid en geuldiepte langs het estuarium worden verwaarloosd.
- De netto volumeveranderingen worden per traject gelijkmatig verdeeld over het gehele geuloppervlak. Er wordt geen rekening gehouden met eventuele veranderingen van het watervolume van het intergetijdengebied (berging).
- De M2-amplitude ter plaatse van Vlissingen wordt constant verondersteld, d.w.z. niet beïnvloed door de ingrepen.
- De berekende M2-amplitude in Terneuzen wordt gebruikt als randvoorwaarde voor het traject Terneuzen-Hansweert. Vervolgens wordt de berekende M2-amplitude in Hansweert als randvoorwaarde gebruikt voor het traject Hansweert-Bath.
- De modelinstellingen (convergentielengte en ruwheid) zijn gelijk genomen aan de instellingen die volgen uit de kalibratie (Hoofdstuk 3).

Figuur 4.10 toont de met het analytische model berekende M2-amplitude langs het estuarium voor de situaties zonder en met zandwinning en de beginsituatie in 2006.

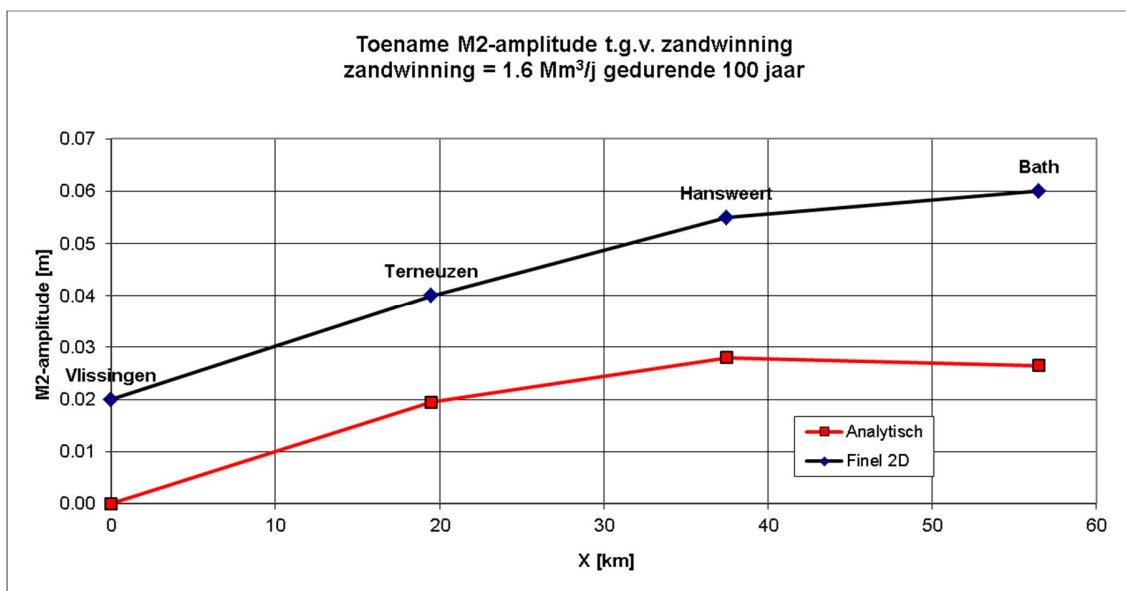


Figuur 4.10: M2-amplitude langs het estuarium volgens het analytische model voor beginsituatie (2006) en na 100 jaar zonder en met zandwinning.

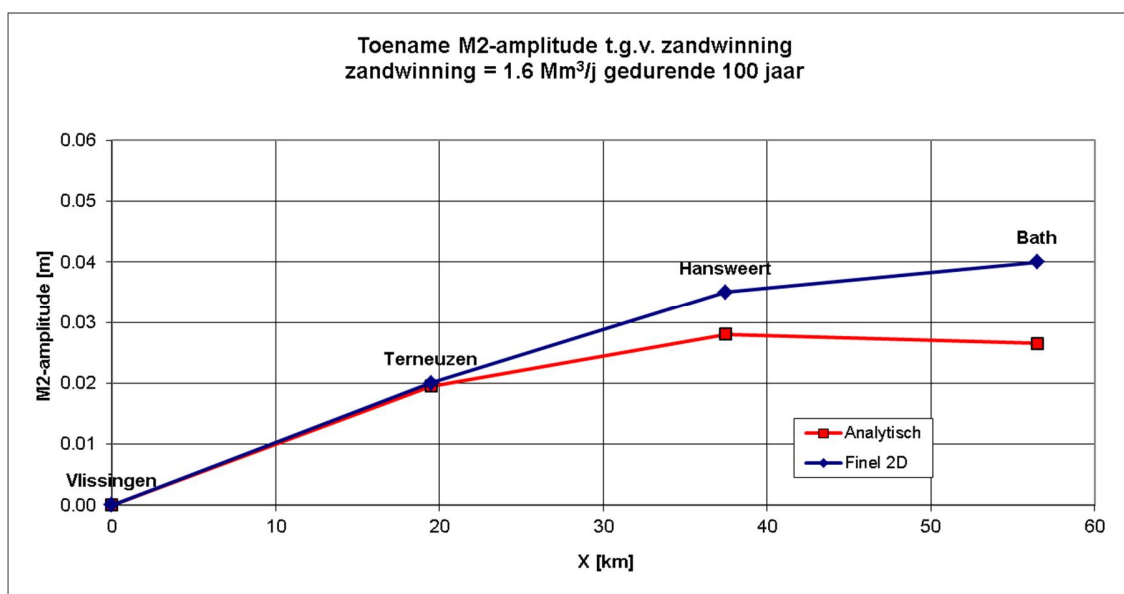
<sup>13</sup> Hierbij is verondersteld, dat de volumeveranderingen alleen betrekking hebben op de geul.

Indien geen zandwinning wordt gepleegd is sprake van een afname van de M2-amplitude t.o.v. de referentie (2006) afwaarts van Hansweert. Dit is het gevolg van de afname van het geulvolume tussen Vlissingen en Terneuzen (de afname is het netto resultaat van zandwinning, baggeren en storten en natuurlijke morfologische veranderingen zoals berekend met Finel2D). Door de toename van het geulvolume tussen Hansweert en Bath neemt de M2-amplitude, ook zonder zandwinning, in Bath toe t.o.v. 2006. Indien wel zand wordt gewonnen neemt langs alle trajecten in de Westerschelde het geulvolume toe, zodat ook de M2-amplitude in Terneuzen, Hansweert en Bath toeneemt.

In Figuur 4.11a worden de veranderingen van de M2-amplitude langs de Westerschelde volgens Finel2D en het analytische model getoond, die het gevolg zijn van de zandwinning. In Figuur 4.11b worden de veranderingen t.o.v. Vlissingen getoond.



Figuur 4.11a: Veranderingen M2-amplitude ten gevolge van zandwinning volgens Finel2D en het analytische model.



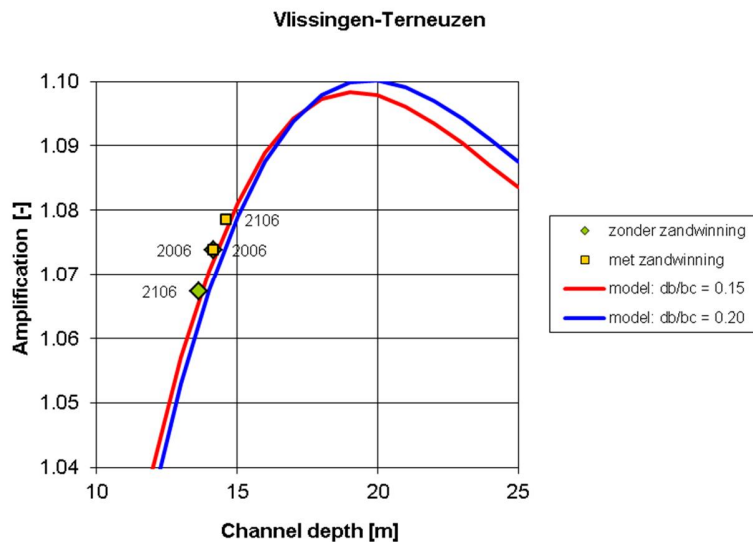
Figuur 4.11b: Veranderingen M2-amplitude t.o.v. Vlissingen ten gevolge van zandwinning volgens Finel2D en het analytische model.

De effecten van de zandwinning in de Westerschelde strekken zich volgens de Finel2D-simulatie uit tot afwaarts van Vlissingen. Dit effect kan niet met het analytische model worden weergegeven, omdat netto volumeveranderingen afwaarts van Vlissingen, als input voor het model, nul worden verondersteld. Het lijkt niet waarschijnlijk, dat de morfologische veranderingen in de Voordelta, zoals berekend door Finel2D, verschillend zijn voor de simulaties zonder en met zandwinning. De veranderingen in Vlissingen zijn dus het gevolg van de ingrepen in het estuarium opwaarts van Vlissingen ofwel: ingrepen in het opwaartse deel zijn van invloed op het getij afwaarts.

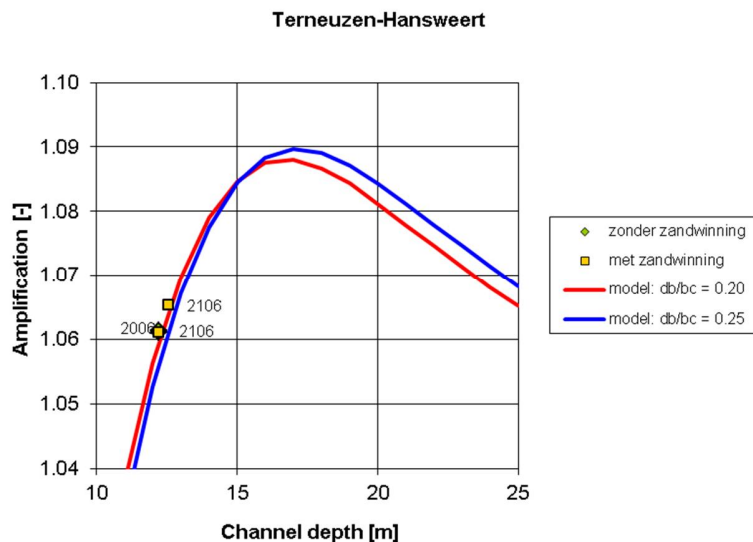
De orde-grootte van de veranderingen van de M2-amplitude ten gevolge van de zandwinning en het verloop langs het estuarium worden door het analytische model redelijk goed weergegeven. Tussen Hansweert en Bath wordt een afname van de M2-amplitude t.o.v. de situatie zonder zandwinning berekend (ondanks de toename van het geulvolume). Ook Finel2D toont een geringere toename van de M2-amplitude in vergelijking met het midden en westelijke deel van de Westerschelde, ondanks de relatief grote toename van de geuldiepte.

De Figuren 4.12a-c tonen de met het analytische model berekende veranderingen van de amplificatie van de M2-amplitude als functie van de geuldiepte voor de drie trajecten.

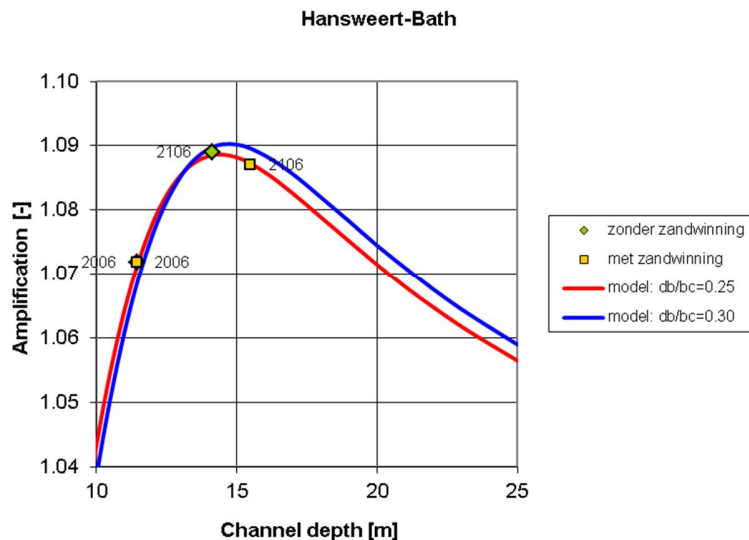




Figuur 4.12a: Analytisch model voor traject Vlissingen-Terneuzen. Amplificatie M2-amplitude als functie van de geuldiepte. Zonder zandwinning: groene symbolen; met zandwinning: oranje symbolen. Lijnen: continue verloop voor  $\Delta b/b_{ch} = 0.15$  (situatie 2006) en  $0.20$ .



Figuur 4.12b: Analytisch model voor traject Terneuzen-Hansweert. Amplificatie M2-amplitude als functie van de geuldiepte. Zonder zandwinning: groene symbolen; met zandwinning: oranje symbolen. Lijnen: continue verloop voor  $\Delta b/b_{ch} = 0.20$  (situatie 2006) en  $0.25$ .



Figuur 4.12c: Analytisch model voor traject Hansweert-Bath. Amplificatie M2-amplitude als functie van de geuldiepte. Zonder zandwinning: groene symbolen; met zandwinning: oranje symbolen. Lijnen: continue verloop voor  $\Delta b/b_{ch} = 0.25$  (situatie 2006) en 0,30.

Een verdere toename van de geuldiepte voor de trajecten Vlissingen-Terneuzen en Terneuzen-Hansweert na 100 jaar zandwinning zal resulteren in een verdere vergroting van de amplificatie van de M2-amplitude over deze trajecten en dus tot een toename van de M2-amplitude opwaarts. Voor het traject Hansweert-Bath geeft het analytische model aan, dat na 100 jaar de maximale amplificatie is bereikt voor de situaties zonder en met zandwinning, op basis van de door Finel2D berekende morfologische veranderingen. De extra toename van het geulvolume door de zandwinning leidt volgens het analytische model dan zelfs tot een geringe afname van de amplificatie. Deze uitkomst kan echter niet zo direct worden overgenomen. De resultaten van het analytische model blijven vooral bedoeld om resultaten nader te analyseren en systeeminzicht te verkrijgen. Voor absolute uitspraken is meer onderzoek nodig, onder meer met numerieke modellen. Belangrijk gegeven is bijvoorbeeld ook dat bij een bepaalde afname van het sedimentvolume door zandwinning de veranderingen in de geulen in het opwaartse smalle deel groter zijn dan in het afwaartse brede deel. De resultaten van het analytische model worden wel ondersteund door de resultaten van Finel2D, die laten zien dat een relatieve grote toename van de geuldiepte over het traject Hansweert-Bath ten gevolge van de zandwinning (+1,35 m; zie Tabel 4.4) leidt tot een beperkte toename van de M2-amplitude (+0,5 cm; zie Figuur 4.9). Over het traject Vlissingen-Terneuzen is de toename van de M2-amplitude 2 cm bij een toename van de geuldiepte met 1 m. Over het traject Terneuzen-Hansweert is de toename van de geuldiepte slechts 0,33 m maar de toename van de M2-amplitude driemaal groter (+1,5 cm; zie Figuur 4.9) dan tussen Hansweert en Bath.

#### 4.2.3 Conclusies

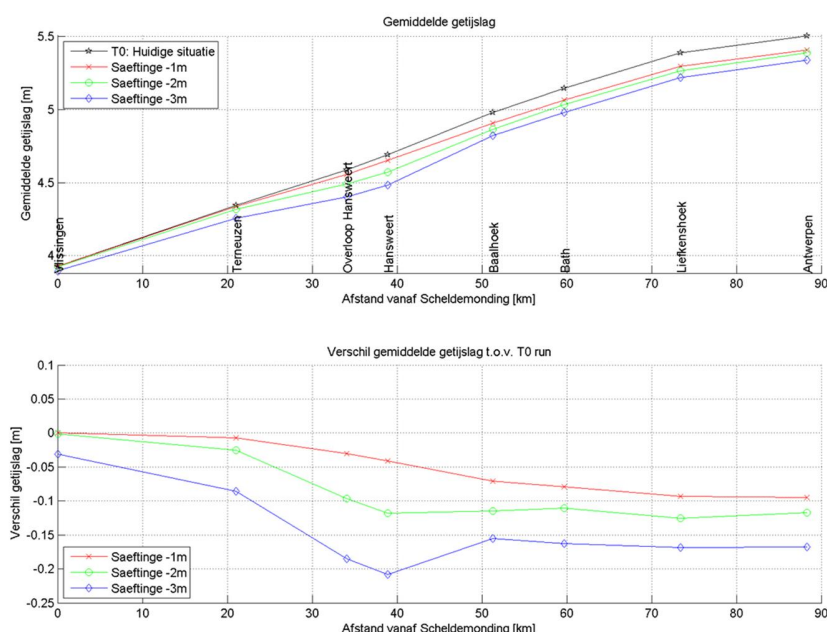
- 1 De toename van de watervolumeveranderingen in drie trajecten, door zandwinning in de Westerschelde, leidt volgens Finel2D en het analytische model tot een toename van de M2-amplitude. Finel2D berekent ook een toename in Vlissingen; in het analytische model is er geen verandering, omdat hier de randvoorwaarde voor het model wordt voorgeschreven. De effecten van de zandwinning bedragen maximaal 6 cm.
- 2 Indien de veranderingen t.o.v. Vlissingen worden beschouwd, wordt de toename van de M2-amplitude door zandwinning door het analytische model iets onderschat t.o.v. Finel2D (~1 cm in Hansweert en Bath).
- 3 De M2-amplitude is in het traject Hansweert-Bath, vergeleken met de beide andere trajecten, relatief ongevoelig voor veranderingen van het geulvolume. Dit wordt door zowel Finel2D als het analytische model aangegeven. Volgens het analytische model komt dit, omdat de maximale amplificatie over dit traject is bereikt.

### 4.3 Verlaging Land van Saeftinge

#### 4.3.1 Schematisatie

Met Finel2D zijn in het verleden drie simulaties gedaan, waarbij het effect van een verlaging van het Land van Saeftinge met 1, 2 en 3 meter op de waterstanden is nagegaan. Met het verlagen van het Land van Saeftinge wordt het kombergend volume van het estuarium vergroot. In het vervolg wordt alleen de bodemverlaging met 2 m beschouwd. Met een oppervlakte van het Land van Saeftinge van 3000 ha ( $30 \text{ Mm}^2$ ) en een verlaging van 2 m neemt het kombergend volume dan toe met  $60 \text{ Mm}^3$ . Hierbij is verondersteld, dat bij verlaging van de bodem het volledige oppervlak bijdraagt aan de toename van het kombergend volume.

Figuur 4.13 toont de met Finel2D berekende effecten op de getijslag (pers. comm. Gerard Dam).



Figuur 4.13: Berekende veranderingen van de getijslag met *Fine2D* na bodemverlagingen van 1, 2 en 3 m van het Land van Saeftinge (pers. comm. Gerard Dam).

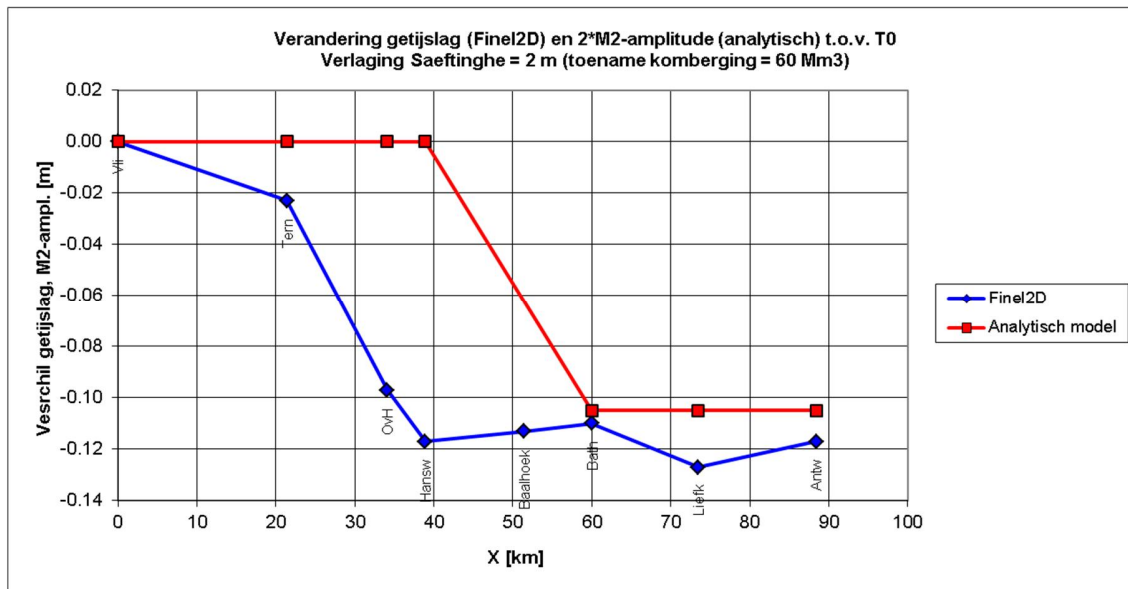
Het watervolume boven het intergetijdengebied tussen Hansweert en Bath (excl. Land van Saeftinge) bedraagt anno 2008 35 Mm<sup>3</sup> (LTV V&T-rapport G-5). Met het analytische model is de M2-amplitude berekend voor de sectie Hansweert-Bath waarbij het kombergend volume is vergroot van 35 Mm<sup>3</sup> naar 95 Mm<sup>3</sup>. Hierbij is de M2-amplitude in Hansweert onveranderlijk verondersteld. De verhouding tussen de kombergende breedte (van het intergetijdengebied) en de geulbreedte voor het traject Hansweert-Bath neemt hierdoor toe van 0,24 naar 0,64, zie Tabel 4.5. De overige dimensies (watervolume en oppervlak geul) zijn niet veranderd.

Tabel 4.5: Berekening verhouding bergende breedte van intergetijdengebied ( $\Delta b$ ) en geulbreedte ( $b_c$ ).

Oppervlak geul (op NAP-2m)	A	37 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Lengte traject	L	19000 m
Breedte geul	$B_c = A/L$	1950 m
Watervolume boven intergetijdengebied	$V_{IGG}$	35 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Getijslag	G	~ 4 m
Breedte intergetijdengebied	$\Delta b = V_{IGG}/(G \cdot L)$	460 m
$\Delta b/b_c$		0,24
Watervolume boven intergetijdengebied incl. Land van Saeftinge na 2 m verlaging		95 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
$\Delta b/b_c$		0,64

#### 4.3.2 Resultaten

In Figuur 4.14 worden de veranderingen van de bodemverlaging van het Land van Saeftinghe volgens het analytische model vergeleken met de resultaten van Finel2D.

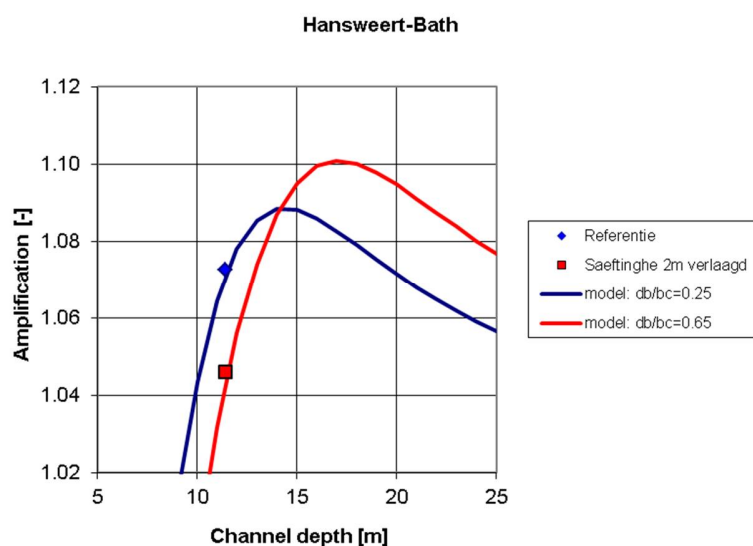


Figuur 4.14: Berekende veranderingen getijslag (Finel2D) en 2\*M2-amplitude (analytisch model) ten gevolge van de bodemverlaging van het Land van Saeftinghe met 1 m.

Hoewel twee verschillende grootheden met elkaar worden vergeleken (getijslag = HW-LW van Finel2D met 2\*M2-amplitude van het analytische model) stemmen de grootte orde van de veranderingen met elkaar overeen. Door de wijze van schematisatie met het analytische model treedt de afname van de M2-amplitude op tussen Hansweert en Bath. Volgens Finel2D zijn de effecten van de toename van het kombergingsvolume al merkbaar afwaarts van Hansweert. De getijslag in Vlissingen wordt niet meer beïnvloed. Door de extra komberging neemt het getijvolume afwaarts van het Land van Saeftinghe met  $2 \cdot 60 = 120 \text{ Mm}^3$  toe ofwel 6% van het getijvolume bij Vlissingen en 12% van het getijvolume halverwege Terneuzen-Hansweert. Dit leidt tot grotere stroomsnelheden en daardoor tot een grotere energiedissipatie en dus tot een afname van de getijslag.

De voortplantingssnelheid van de getijgolf neemt volgens het analytische model tussen Hansweert en Bath af van 14,7 m/s naar 9,9 m/s. De looptijd van de getijgolf over een afstand van 19 km tussen Hansweert en Bath neemt daardoor toe met 10 min. Volgens Finel2D neemt in Antwerpen de looptijd als gemiddelde van die van hoog- en laagwater toe met 12 min.

Figuren 4.15a en 4.15b geven de amplificatie van de M2-amplitude en de getijvoortplantingssnelheid tussen Hansweert en Bath als functie van de geuldiepte voor  $\Delta b/b_c = 0,25$  en  $0,65$ . Volgens het analytische model (Figuur 4.15a) zou een toename van de komberging bij een geuldiepte groter dan 15 m leiden tot een toename van de amplificatie. Deze anti-intuïtieve hypothese zou kunnen worden getoetst met een numeriek model.



Figuur 4.15a: Amplificatie van de M2-amplitude als functie van de geuldiepte voor  $\Delta b/bc = 0,25$  (referentie) en  $\Delta b/bc = 0,65$  (Saeftinghe 2 m verlaagd).



Figuur 4.15b: Getijvoortplantingssnelheid als functie van de geuldiepte voor  $\Delta b/bc = 0,25$  (referentie) en  $\Delta b/bc = 0,65$  (Saeftinghe 2 m verlaagd).

#### 4.3.3 Conclusies

De toepassing van het analytische model voor een situatie waarbij de komberging wordt vergroot (en de geuldiepten onveranderd blijven) toont dat de grootteorde van de veranderingen in de amplificatie en de getijvoortplantingssnelheid kunnen worden bepaald

met het model. Door de wijze van schematisatie (nl. een onveranderlijke waterstand t.p.v. de afwaartse rand van het traject: Hansweert) treden de veranderingen in het getij alleen stroomopwaarts van deze rand op. Bij een complexere schematisatie (Finel2D) zijn de effecten al merkbaar afwaarts van Hansweert. In dit geval zou het beter geweest zijn de afwaartse rand ter plaatse van Vlissingen te leggen, of beter nog Westkapelle, maar dan wordt de geometrie en bodem met slechts één exponentieel variërende breedte en constante geuldiepte minder goed benaderd. De schematisatie van de toegenomen komberging vindt dan langs het gehele estuarium plaats.

Met een toename van het kombergend volume van  $60 \text{ Mm}^3$  als gevolg van de bodemverlaging van 2 m van het Land van Saeftinge kan een reductie van de getijslag van ongeveer 12 cm worden bereikt. Een toename van het kombergend volume zou ook kunnen worden verkregen door het zandvolume van de intergetijdengebieden te verkleinen (dus meer waterberging). Het totale zandvolume van de intergetijdengebieden (tussen NAP-2m tot NAP+2m) voor het traject Vlissingen-Bath bedroeg in 2008  $135 \text{ Mm}^3$  (LTV V&T-rapport G-5). In de periode 1955-2008 is het zandvolume van het intergetijdengebied tussen Terneuzen en Bath toegenomen met  $25 \text{ Mm}^3$  (tussen Vlissingen en Terneuzen was er sprake van een afname). Indien deze toegenomen zandhoeveelheid weer zou worden verwijderd zou de getijslag met orde 5 cm kunnen worden gereduceerd indien de berging op het intergetijdengebied zich op dezelfde wijze gedraagt als de berging op Saeftinge. Hierbij moet bedacht worden, dat het onderscheid tussen een stroomvoerend en een kombergend deel van de dwarsdoorsnede kunstmatig is. In werkelijkheid zal het intergetijdengebied ook onderdeel kunnen zijn van het stroomvoerend profiel. In een numeriek model hoeft een dergelijk onderscheid niet a priori te worden gemaakt en kunnen de effecten dus beter worden afgeschat.





## 5 Toepassing van het analytische model voor bepaling getijasymmetrie

### 5.1 Inleiding

Het analytische model voor getijvoortplanting in een convergerend estuarium is gebruikt om de waargenomen veranderingen van de amplificatie van het getij (waterstanden) en de voortplantingssnelheid in de Westerschelde te reproduceren, zie Hoofdstuk 3. In deze paragraaf wordt nagegaan of het model ook kan worden gebruikt om de getijasymmetrie en veranderingen hierin weer te geven (Par. 5.2). Par. 5.3 bevat een vergelijking tussen de duur van het opgaand tij en het faseverschil 2M2-M4. Slotopmerkingen zijn vermeld in Par. 5.4.

### 5.2 Getijasymmetrie

#### 5.2.1 Werkwijze

De getijasymmetrie, in termen van de duur van het opgaand tij, wordt bepaald door de voortplantingssnelheden van hoog- en laagwater. Het analytische model “kent” slechts één voortplantingssnelheid, nl. die van het M2-getij. Per definitie is de voortplantingssnelheid van hoog- en laagwater hetzelfde, omdat de getijcurve in het model niet vervormt. Om hierover toch iets te kunnen zeggen wordt het model toegepast voor de situatie rond hoogwater en de situatie rond laagwater. Het analytische model moet dan worden gevoed met de geuldiepte op hoogwater en de geuldiepte op laagwater in twee afzonderlijke simulaties.

Uit observaties komt naar voren, dat tussen Terneuzen en Hansweert het laagwater zich sneller voortplant dan het hoogwater. Dit kan op de volgende manieren worden veroorzaakt:

- de gemiddelde waterdiepte tijdens hoogwater is kleiner dan tijdens laagwater indien het wateroppervlak op hoogwater (veel) groter is dan het wateroppervlak tijdens laagwater;
- de convergentielengten tijdens hoog- en laagwater verschillen.

Het eerste blijkt in de Westerschelde niet het geval te zijn (zie Figuren 5.1 t/m 5.3; venster rechtsonder). Daarom is gekeken naar de convergentielengte van het oppervlak van de dwarsdoorsnede. Deze blijkt inderdaad te verschillen. Maar ook hier geldt dat de convergentielengte niet voldoende nauwkeurig uit de (beperkte) data kan worden gehaald. Daarom is het analytische model met de convergentielengten gekalibreerd op de voortplantingssnelheden van hoog- en laagwater. Achteraf wordt nagegaan of het langsverloop van de dwarsdoorsneden tijdens laag- en hoogwater met de gekalibreerde convergentielengten goed wordt beschreven. De Nikuradse-ruwheid is niet veranderd t.o.v. de kalibratie zoals beschreven in Hoofdstuk 3. De gekalibreerde convergentielengten voor het dwarsoppervlak zijn vermeld in Tabel 5.1.

Tabel 5.1: Convergentielengte per sectie in analytische model.

Sectie	Convergentielengte hoogwater [km]	Convergentielengte t.o.v. NAP [km] (zie Hoofdstuk 3)	Convergentielengte laagwater [km]
V-T	36	39	47
T-H	200	33	33
H-B	26	27	35

## 5.2.2 Resultaten

In de figuren 5.1 t/m 5.3 worden de resultaten van het analytische model getoond:

- linksboven: de waargenomen en berekende duur van het opgaand tij in het landwaartse station van een sectie;
- rechtsboven: de waargenomen en berekende getijvoortplantingssnelheid van hoog- en laagwater;
- rechtsonder: de geuldiepte tijdens hoog- en laagwater welke volgt uit de hypsometrische curven.

De berekende duur van het opgaand tij in het opwaartse station van elke sectie volgt uit de waargenomen duur in het afwaartse station, de sectielengte en de voortplantingssnelheden van hoog- en laagwater over de sectie:

Stel tijdstip hoogwater in Vlissingen:  $t_V^{HW}$   
en tijdstip hoogwater in Terneuzen:  $t_T^{HW}$   
dan geldt:  $t_T^{HW} = t_V^{HW} + L_{VT}/c_{VT}^{HW}$   
waarbij  $L_{VT}$  de sectielengte en  $c_{VT}$  de voortplantingssnelheid van het traject Vlissingen-Terneuzen zijn.

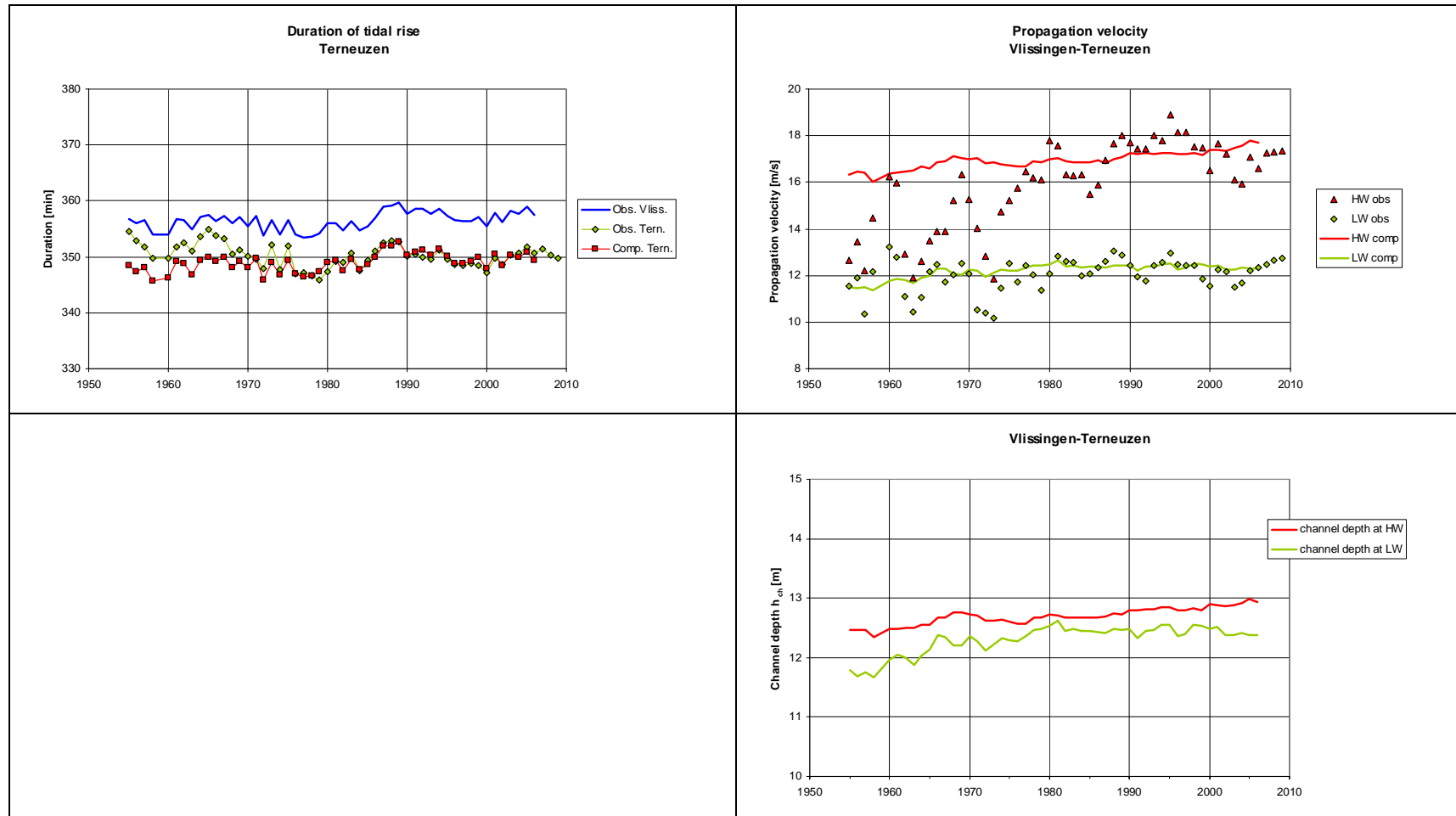
Analoog geldt voor laagwater:  $t_T^{LW} = t_V^{LW} + L_{VT}/c_{VT}^{LW}$ .

De duur van het opgaand tij in Terneuzen is dan:

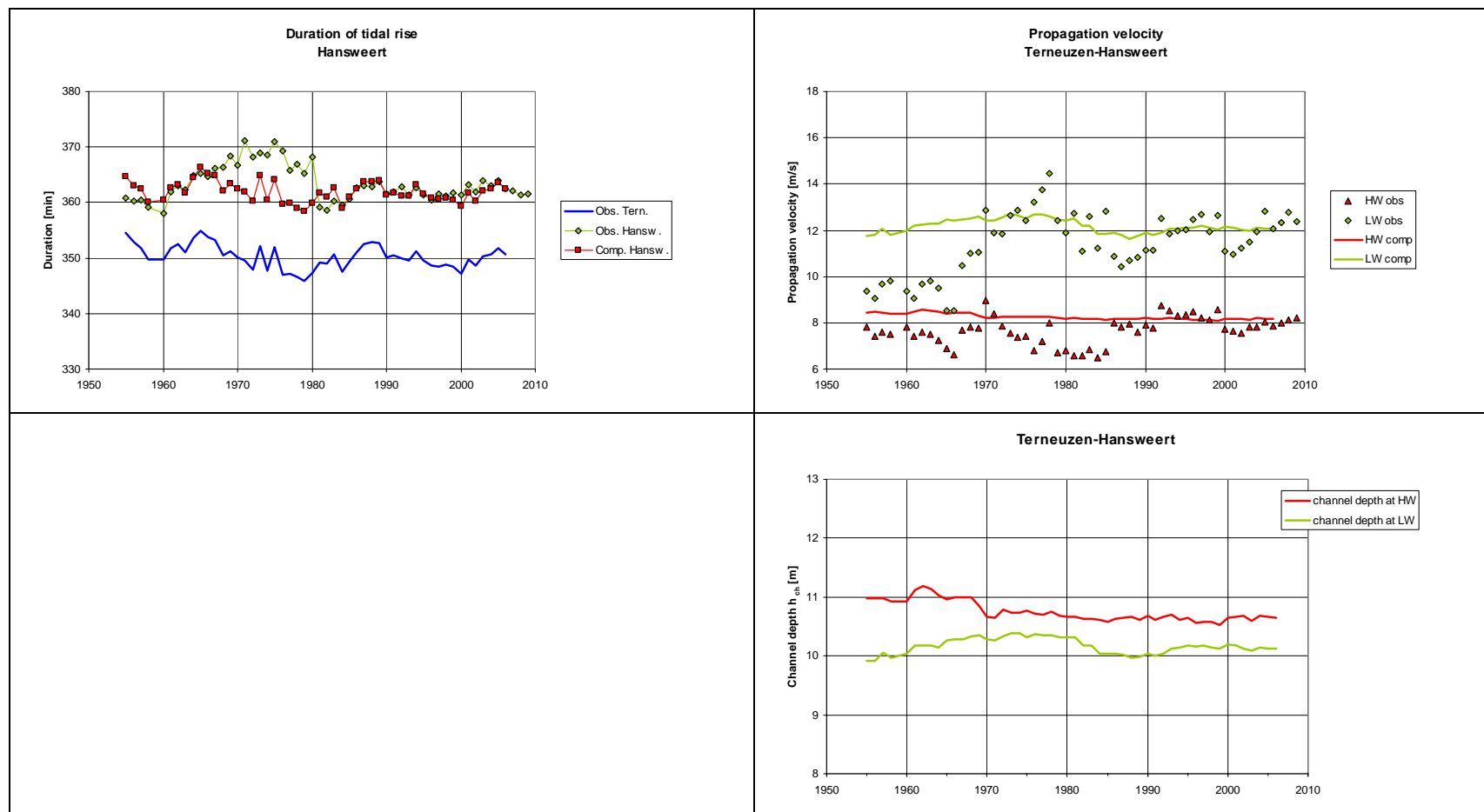
$$\begin{aligned}
 T_T^{opg} &= t_T^{HW} - t_T^{LW} \\
 &= t_V^{HW} + L_{VT}/c_{VT}^{HW} - t_V^{LW} - L_{VT}/c_{VT}^{LW} \\
 &= t_V^{opg} + L_{VT}/c_{VT}^{HW} - L_{VT}/c_{VT}^{LW}
 \end{aligned}$$

Uit de Figuren 5.1 t/m 5.3 volgt dat de getijvoortplantingssnelheden van hoog- en laagwater en dus ook de getijasymmetrie in termen van de duur van het opgaand tij redelijk kunnen worden gereproduceerd, vooral na 1970 (Vlissingen) en na 1980 (Hansweert en Bath). Het verloop in Hansweert tussen 1965 en 1980 wordt niet door het model weergegeven. Ook in Bath wijkt het model in die periode af van de waarnemingen. Een hypothese is, dat als de waarnemingen in Hansweert fout zouden zijn dan ook de berekende waarden voor de duur van het opgaand tij in Bath fout zijn, omdat in het model de waarnemingen in Hansweert worden gebruikt als randvoorwaarde voor de sectie Hansweert-Bath. Indien de *berekende* waarden in Hansweert worden gebruikt als randvoorwaarde, leidt dit tot een betere modelreproductie in Bath, zie Figuur 5.4.

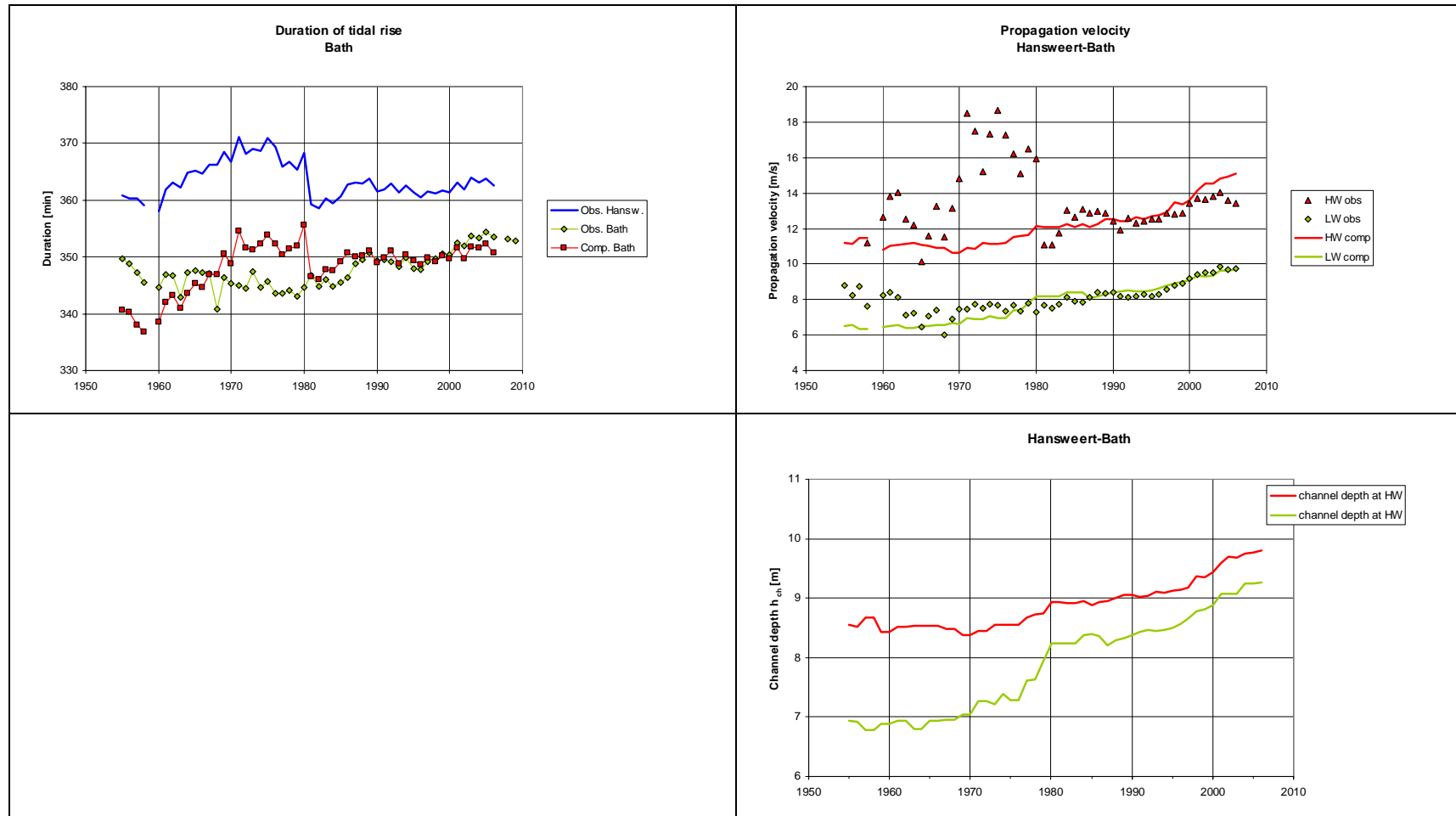
# Deltares



Figuur 5.1: Waargenomen en berekende duur opgaand tij in Terneuzen (linksboven), waargenomen en berekende getijvoortplantingssnelheden van hoog- en laagwater voor de sectie Vlissingen-Terneuzen (rechtsboven) en geuldiepte tijdens hoog- en laagwater (rechtsonder) voor de sectie Vlissingen-Terneuzen.



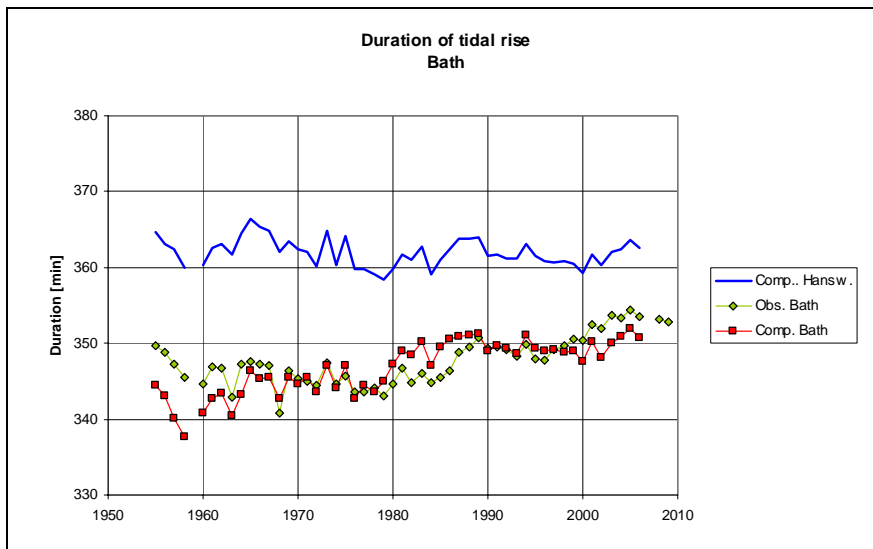
Figuur 5.2: Waargenomen en berekende duur opgaand tij in Hansweert (linksboven), waargenomen en berekende getijvoortplantingssnelheden van hoog- en laagwater voor de sectie Temeuzen-Hansweert (rechtsboven) en geuldiepte tijdens hoog- en laagwater (rechtsonder) voor de sectie Terneuzen-Hansweert.



Figuur 5.3: Waargenomen en berekende duur opgaand tij in Bath (linksboven), waargenomen en berekende getijvoortplantingssnelheden van hoog- en laagwater voor de sectie Hansweert-Bath (rechtsboven) en geuldiepte tijdens hoog- en laagwater (rechtsonder) voor de sectie Hansweert-Bath.

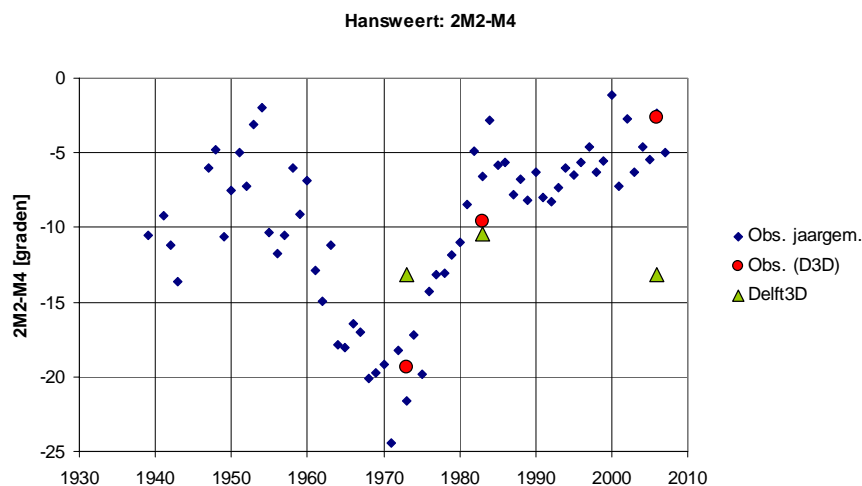






Figuur 5.4: Waargenomen en berekende duur opgaand tij in Bath met als randvoorwaarde de berekende duur van het opgaand tij in Hansweert.

Met Delft3D (NEVLA-model) zijn voor drie verschillende jaren (1973, 1983 en 2006) simulaties gedaan (LTV V&T-rapport G-4). Het waargenomen faseverschil 2M2-M4 is vergeleken met het door Delft3D berekende faseverschil. In Figuur 5.5 worden de resultaten voor Hansweert getoond.

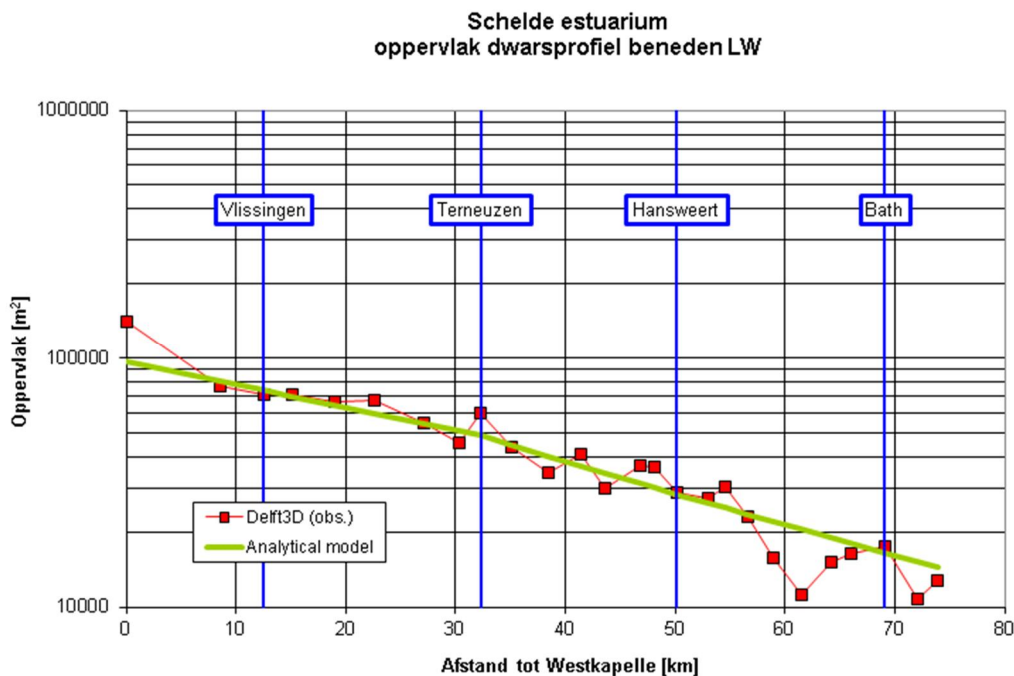


Figuur 5.5: Waargenomen en door Delft3D (NEVLA-model) berekende faseverschil 2M2-M4 in Hansweert. Blauwe symbolen: waargenomen jaargemiddelde waarden; rode symbolen: waargenomen waarde voor de simulatieperioden; groene symbolen: door Delft3D berekende waarden.

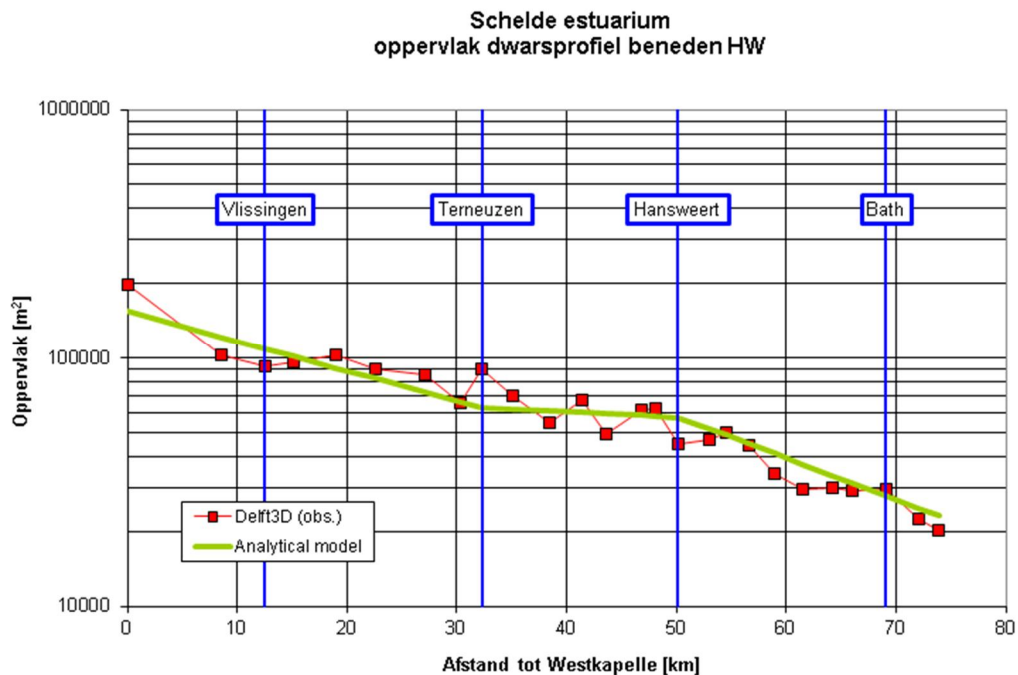
De waargenomen faseverschillen 2M2-M4 voor de simulatieperiode (rode symbolen) wijken iets af van de waargenomen jaargemiddelde waarden (blauwe symbolen). Een mogelijke oorzaak voor de verschillen tussen observaties en modelresultaten is dat vóór 1971 met een tijdstap van 3 uur is gemeten, wat mogelijk te groot is voor een nauwkeurige bepaling van de M4-component. Gedurende de periode 1971 t/m 1986 is gemeten met een tijdstap van 1 uur. Sinds 1987 wordt met intervallen van 10 minuten gemeten. De meetfrequentie kan echter geen verklaring zijn voor de verschillen tussen waarnemingen en Delft3D in 2006. Het blijft

daarom onduidelijk wat de oorzaak is van het verloop van de fase 2M2-M4 tussen 1950/1960 en 1985.

In de Figuren 5.6 en 5.7 zijn de dwarsdoorsneden tijdens laag- en hoogwater, zoals berekend met de gekalibreerde convergentielengten, vergeleken met de gemeten dwarsdoorsneden volgens de Delft3D-bodem van 1998. Hieruit blijkt, dat de schematisatie die is gebruikt voor het model goed de geometrie van de Westerschelde beschrijft. De grotere convergentielengte tussen Terneuzen en Hansweert tijdens hoogwater (200 km, maar zou ook orde 100 km kunnen zijn) zorgt er voor, dat de voortplantingssnelheid tijdens hoogwater kleiner is dan tijdens laagwater. Of dit echt zo is kan niet echt worden aangetoond, maar het is wel een mogelijke verklaring.



Figuur 5.6: Waargenomen en berekende dwarsstroomoppervlak tijdens laagwater. Rode symbolen: Delft3D bodem gebaseerd op waarnemingen in 1998; groene lijn: analytisch model, convergentielengten volgens Tabel 5.1.

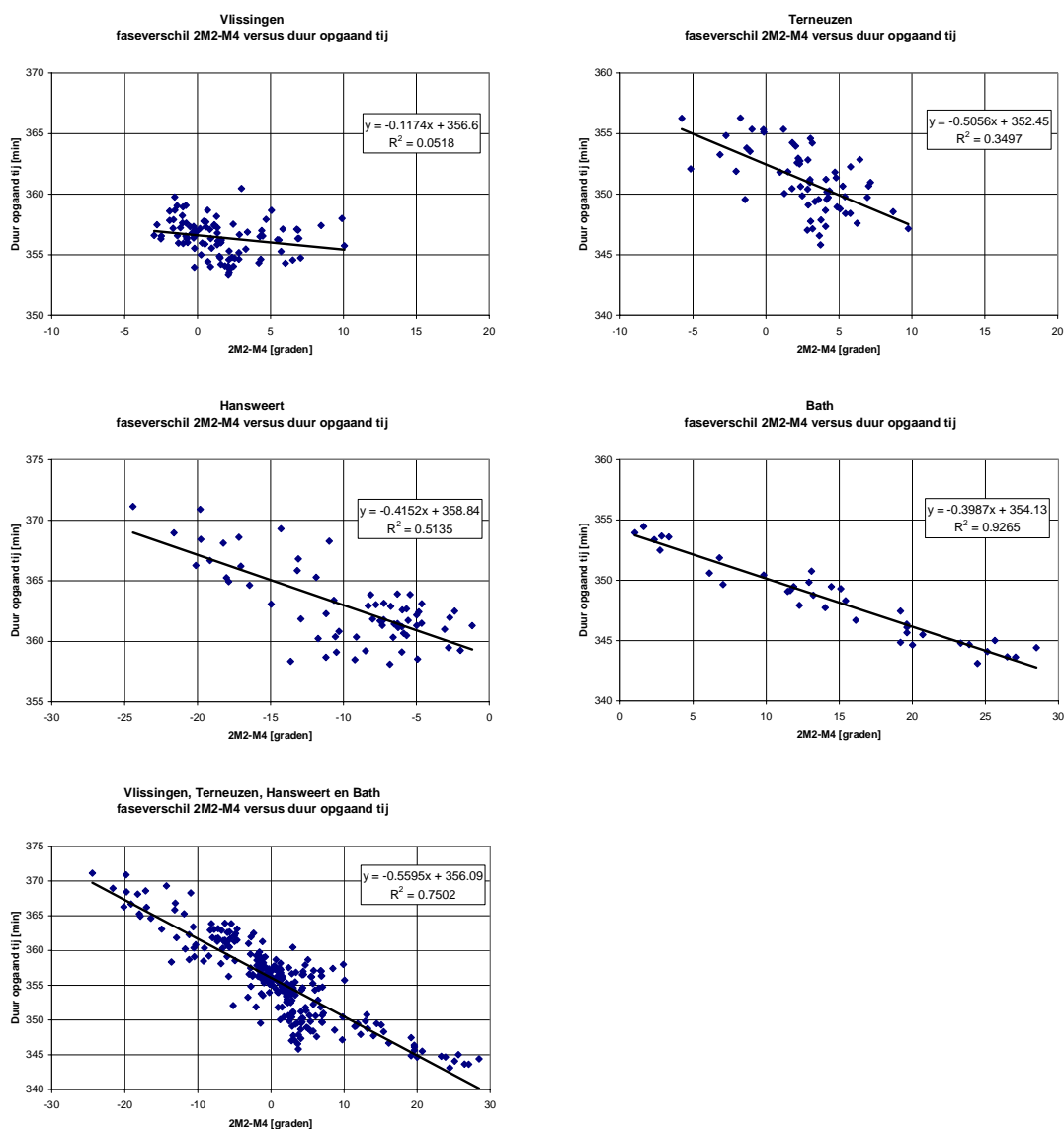


Figuur 5.7: Waargenomen en berekende dwarsstroomoppervlak tijdens hoogwater. Rode symbolen: Delft3D bodem gebaseerd op waarnemingen in 1998; groene lijn: analytisch model, convergentielengten volgens Tabel 5.1.

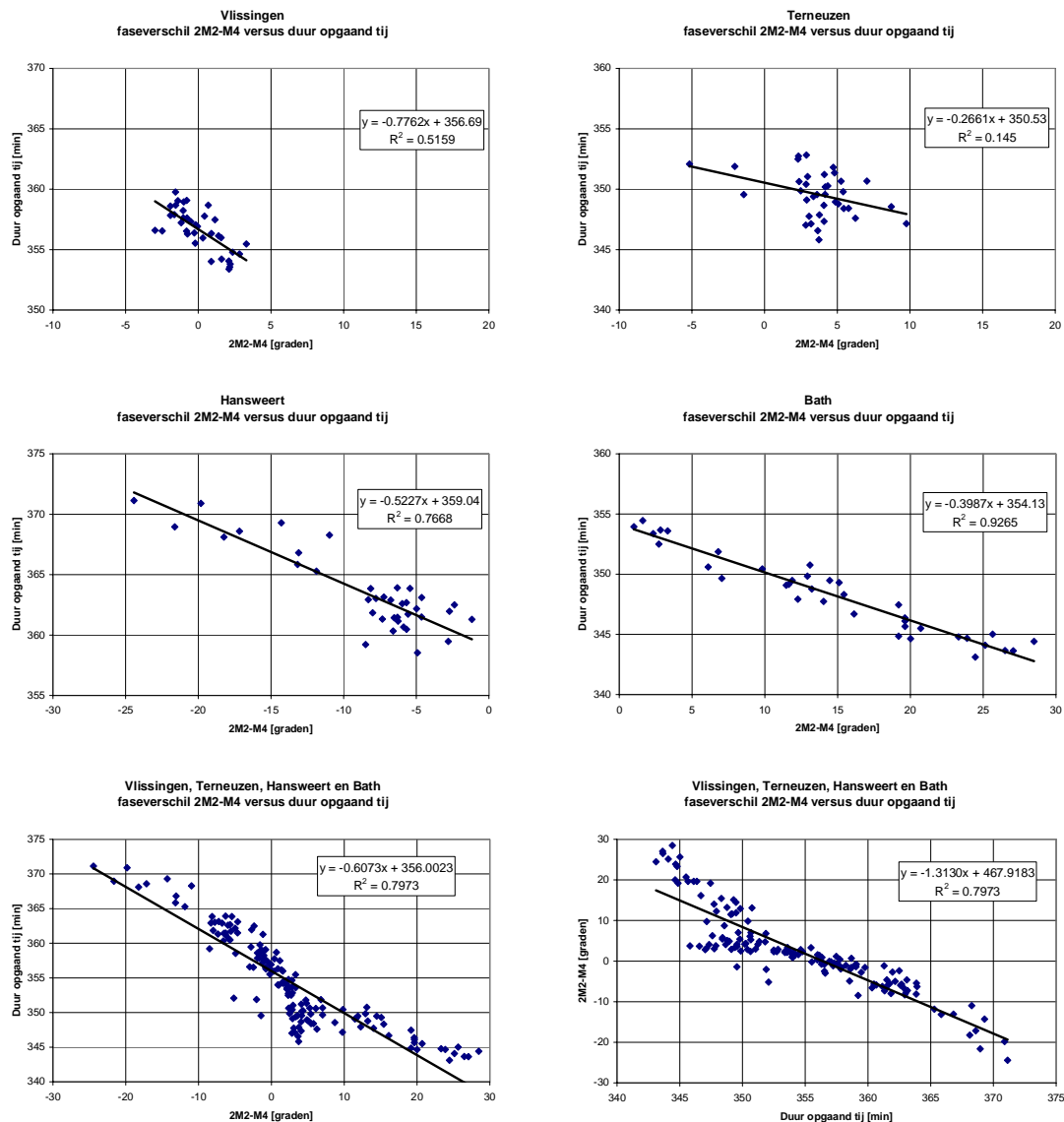
### 5.3 Relatie duur opgaand tij en faseverschil 2M2-M4

Omdat de tijdstippen van hoog- en laagwater momentopnamen zijn met een bepaalde nauwkeurigheid (vroeger was de bemonsteringfrequentie niet al te hoog) kan de duur van opgaand tij hier nogal gevoelig voor zijn, ook al betreft het jaargemiddelde waarden). Het faseverschil 2M2-M4 is afgeleid van de gehele getijcurve en daarom waarschijnlijk nauwkeuriger. Gekeken is naar een correlatie tussen beide grootheden, zie Figuren 5.8 en 5.9. In Figuur 5.8 zijn alle beschikbare data gebruikt (Vlissingen vanaf 1911, Terneuzen vanaf 1940, Hansweert vanaf 1939 en Bath vanaf 1971). In Figuur 5.9 zijn in alle stations alleen de data vanaf 1971 gebruikt.

Opvallend is (Figuur 5.8) dat de correlatie tussen beide grootheden toeneemt gaande van Vlissingen naar Bath. In het algemeen neemt de duur van het opgaand tij af (meer vloeddominant) als het faseverschil groter wordt (ook meer vloeddominant). Dit is conform de verwachtingen. De data van alle stations samen volgen redelijk goed één lineair verband. Indien alleen de data vanaf 1971 wordt gebruikt nemen de regressiecoëfficiënten toe (m.u.v. Terneuzen).



Figuur 5.8: Correlatie tussen duur opgaand tij en faseverschil 2M2-M4 op basis van alle data.



Figuur 5.9: Correlatie tussen duur opgaand tij en faseverschil 2M2-M4 op basis van data vanaf 1971.

## 5.4 Slotopmerkingen

De toepassing van het analytische model op de Westerschelde voor de reproductie van de getijasymmetrie betreft feitelijk een kalibratie van het model op de voortplantingssnelheden van hoog- en laagwater. Als het model in staat is deze voortplantingssnelheden te reproduceren wordt tegelijkertijd de duur van het opgaand tij correct weergegeven. De kalibratie is uitgevoerd door verschillende convergentielengten tijdens hoog- en laagwater te hanteren. Op deze wijze is het bijvoorbeeld mogelijk om de lagere getijvoortplantingssnelheid tijdens hoogwater in vergelijking met die voor laagwater te simuleren (zodat over het traject Terneuzen-Hansweert sprake is van een afnemende vloeddominantie). Dit lijkt een 'truc', maar vergelijking met de profielen in Delft3D (op basis van de gemeten 1998 bodem) geeft aan, dat met de gekozen convergentielengten voor het analytische model het waargenomen verloop van het dwarsprofieloppervlak redelijk goed wordt beschreven. Wel zijn de uitkomsten van het model gevoelig voor de convergentielengte. De conclusie van deze

exercitie is, dat het analytische model binnen de nauwkeurigheidsgrenzen van de invoerparameters tot realistische uitkomsten komt.

Er is nog geen duidelijkheid over de oorzaak van de variatie van de duur van het opgaand tij in Hansweert tijdens de periode 1965-1980. Als voor het traject Hansweert-Bath gebruik wordt gemaakt van de berekende duur van opgaand tij in Hansweert (volgend uit de berekening voor de sectie Terneuzen-Hansweert) kan de asymmetrie in Bath goed worden gereproduceerd. Indien gebruik wordt gemaakt van de gemeten duur van opgaand tij in Hansweert is dit niet het geval.

Het analytische model heeft, zoals eerder genoemd, een aantal beperkingen:

- de basisaannamen voor het model zijn: (i) kleine getijamplitude t.o.v. de waterdiepte, (ii) constante waterdiepte, (iii) verwaarlozing van de advectieve versnellingsterm ( $udu/dx$ ) en (iv) linearisatie van de weerstandsterm;
- reflecties op de grenzen tussen de secties, die het gevolg zijn van plotselinge veranderingen van waterdiepte, convergentielengte en ruwheid worden verwaarloosd;
- er wordt geen rekening gehouden met opwekking van een M4-harmonische in het estuarium;
- de convergentielengte wordt tijdsafhankelijk verondersteld.

M.b.t. dit laatste punt wordt opgemerkt dat de convergentielengte een modelparameter vormt, die de grootschalige geometrie van het estuarium beschrijft. Omdat de dwarsdoorsnede in een alluviaal systeem in de tijd kan veranderen, hoeft in principe de convergentielengte niet tijdsafhankelijk te zijn.

## 6 Samenvatting en conclusies

In dit hoofdstuk worden de conclusies op hoofdlijnen gegeven. Zij hebben vooral betrekking op de getijslag en de versterking t.o.v. Vlissingen (amplificatie). Voor details wordt verwezen naar de conclusies in de afzonderlijke hoofdstukken en paragrafen.

In het Schelde-estuarium is de evolutie van het getij een belangrijk beheeraspect, omdat de ontwikkeling sturend is voor veel van de functies van het gebied: veiligheid, toegankelijkheid en natuurlijkheid. In dit rapport is vooral gekeken naar de verandering van de getijslag, zoals die is waargenomen vanaf 1901 tot en met 2010 (Hoofdstuk 2). Bij de analyse is, om systeembegrip te vergroten, gebruik gemaakt van een analytisch model dat de getijbeweging beschrijft in een convergerend estuarium, zoals de Schelde tussen de monding en Gent (Hoofdstukken 3 t/m 5).

Hoog- en laagwaterstanden vormen twee getijkarakteristieken, die bij het beheer een belangrijke rol spelen: veiligheid tegen overstromingen en toegankelijkheid voor de scheepvaart. Bovendien wordt de waarde en ontwikkeling van ecologisch interessante gebieden (platen, slikken, schorren) mede bepaald en gestuurd door de waterbeweging. De ontwikkeling van de getijslag in het verleden speelt een belangrijke rol: een toename van de getijslag draagt bij aan een toename van de hoogwaters en een afname van de laagwaters in het oosten en een geringe toename van de laagwaters in het westen (d.i. kleiner dan de toename van de hoogwaters). De grootte van de getijslag in het estuarium wordt bepaald door de getijslag in de monding, als resultaat van de getijbeweging in de Noordzee, en de geometrie en bodemligging van/in het estuarium.

Voor de analyse is gekeken naar de verhouding van de getijslag in meerdere locaties in het estuarium en de getijslag in de mond (Vlissingen). In de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde is deze verhouding (de amplificatie) groter dan één. Daardoor neemt de getijslag langs een groot deel van het estuarium toe in opwaartse richting. Bij een gegeven geometrie en bodemligging hoort de amplificatie als een systeemeigenschap. Veranderingen in het systeem resulteren dus in veranderingen van de amplificatie.

De amplificatie is eveneens afhankelijk van de hydrodynamische randvoorwaarde. Als de getijslag in de mond toeneemt, worden de stroomsnelheden, bij een gegeven bodem, groter en ondervindt de getijgolf meer weerstand door een toename van de bodemwrijving. In dat geval neemt de amplificatie af. Samenvattend geldt, dat veranderingen in het estuarium, maar ook veranderingen in de forcering, kunnen leiden tot een toe- of afname van de amplificatie en dus tot veranderingen in de getijslag in het estuarium.

Op basis van de voorgaande beschrijving kunnen de volgende effecten worden verwacht als gevolg van veranderingen in het gebied en op de rand:

1. Veranderingen in het gebied zijn van invloed op de amplificatie. De getijslag in een locatie opwaarts wordt groter (kleiner) als de amplificatie groter (kleiner) wordt.
2. Een grotere getijslag op de rand leidt tot een toename van de getijslag in een opwaartse locatie die een factor groter is dan de toename op de rand. De factor is gelijk aan de amplificatie als deze onveranderlijk wordt verondersteld.
3. Een grotere getijslag op de rand leidt bij een gegeven bodem tot grotere stroomsnelheden. Door de grotere bodemwrijving neemt de amplificatie af en is de toename van de getijslag uiteindelijk minder groot dan onder punt 2 is aangegeven.



## 6.1 Data-analyse

De getijslag in het Schelde-estuarium is sinds 1901 toegenomen. Begin 20<sup>e</sup> eeuw bedroeg de maximale getijslag 4,5 m tussen Liefkenshoek en Antwerpen, met een versterkingsfactor (amplificatie) t.o.v. Vlissingen van 1,2, als gemiddelde voor het decennium 1901-1910. In het laatste decennium (2001-2010) is de maximale getijslag 5,4 m. Deze wordt bereikt in Tielrode met een amplificatie van 1,4 t.o.v. Vlissingen. De locatie met de maximale getijslag is daarmee ongeveer 30 km in opwaartse richting verschoven, zie Figuur 2.6a.

Gedurende de periode 2001-2010 is de getijslag t.o.v. het voorlaatste tijdvak van 10 jaar (1991-2000) maximaal 0,1 m afgenomen, afwaarts van Tielrode en tot 0,1 m toegenomen opwaarts hiervan (in Melle een toename van 0,2 m), zie Figuur 2.6b. Deze veranderingen worden voor een deel bepaald door de variatie van de getijslag met een 18,6-jaar periode en een amplitude van ongeveer 0,07 m. Indien deze periodieke variatie uit het signaal wordt verwijderd, is tussen 2001 en 2010 de getijslag afwaarts van Hansweert vrijwel gelijk gebleven t.o.v. de voorafgaande 10-jarige periode en opwaarts tot 0,15 m toegenomen, zie Figuur 2.12b.

Het deel van de toename van de getijslag sinds 1901-1910 dat het gevolg is van de toename in Vlissingen bedraagt ongeveer 0,1 m (zijnde de toename in Vlissingen). De toename van de maximale getijslag die het gevolg is van de verandering van de amplificatie (+0,2) is groter en bedraagt ongeveer 0,8 m.

Afwaarts Hansweert is de amplificatie sinds 1901 nagenoeg niet veranderd. De grootste toename is opgetreden tussen Hansweert en Tielrode gedurende twee perioden (Figuur 2.15):

- tussen 1930/1940 en 1950/1960: toename amplificatie 0,10 overeenkomend met een toename van de getijslag in Tielrode van 0,50 m;
- en tussen 1970/1980 en 1980/1990: toename amplificatie 0,15 overeenkomend met een toename van de getijslag in Tielrode van 0,75 m.

De totale toename van de getijslag sinds 1901 bedraagt dus 1,25 m ofwel 30%. Per traject (Hansweert-Bath-Liefkenshoek-Antwerpen-Schelle-Tielrode) is de toename 0,20-0,25 m geweest. Als gevolg hiervan is de getijslag opwaarts van Tielrode ook gestegen. De toename van de amplificatie gaat samen met een waargenomen verruiming van de geulen en afname van de waterberging op de intergetijdengebieden.

De snelheid waarmee de getijslag groter is geworden neemt toe van 0,10-0,15 m/100 jaar in Westkapelle en Vlissingen tot 1,65 m/100 jaar in Tielrode, zie Figuur 2.17b.

Indien de trend en de langjarige variatie (75 jaar), zoals waargenomen in Vlissingen, de komende decennia aanwezig blijven zal de getijslag in Vlissingen in 2060 met 0,15 m zijn toegenomen t.o.v. de huidige situatie (2013). Deze toename zal grotendeels tussen 2020 en 2040 plaatsvinden. Met de huidige amplificatie (maximaal 1,4) zal deze toename in de Zeeschelde tot 40% groter zijn dan in Vlissingen en dus 0,20 m kunnen bedragen.

## 6.2 Verificatie van het analytische model

De analyse van de waargenomen veranderingen van de getijslag in de Westerschelde en Beneden-Zeeschelde met het analytische model tonen een sterke relatie met veranderingen in de geuldiepte (globaal het watervolume in de geul beneden NAP). Dit geldt vooral voor de trajecten Hansweert-Bath (Figuur 3.7) en Bath-Liefkenshoek (Figuur 3.15). De invloed van veranderingen van de waterberging op het intergetijdengebied wordt theoretisch wel verwacht, maar volgt niet uit de uitgevoerde analyse.

Met het model wordt voorspeld dat een verdere verdieping van de geulen uiteindelijk zal resulteren in een maximale amplificatie. Een nog verdere toename van de geuldiepte zal dan weer leiden tot een langzame afname van de amplificatie. Volgens het model lijkt voor het traject Bath-Liefkenshoek een dergelijk maximum al te zijn bereikt (Figuur 3.15). Voor elk van de overige trajecten is een toename van de amplificatie t.g.v. een geulverdieping ter grootte van 0,02 tussen het opwaartse en afwaartse station nog mogelijk (Figuren 3.7, 3.20 en 3.25). De totale toename van de amplificatie tussen Vlissingen en Schelle zou dan ongeveer 0,1 kunnen zijn ofwel een toename van de getijslag opwaarts Schelle van 0,5 m. Gegeven de onzekerheden in de schematisatie met het analytische model dienen de uitspraken m.b.t. de maximale amplificatie vooral als indicatief te worden beschouwd. Verdere onderbouwing met numerieke modelsimulaties kan hier uitsluitsel over geven. Indien de effecten van volumeveranderingen blijken af te hangen van de locatie dan kan in het beheer hiermee rekening worden gehouden.

Het analytische model voorspelt verder dat bij relatieve grote geuldiepten de amplificatie toeneemt bij een toename van de waterberging, zie Figuur 3.15 voor het traject Bath-Liefkenshoek. Dit is anti-intuïtief en kan nader worden onderzocht met numerieke modellen.

Tenslotte kan met het analytische model de waargenomen kleinere voortplantingssnelheid van hoogwater in vergelijking met die van laagwater tussen Terneuzen en Hansweert worden gereproduceerd. Om dit te bereiken is tijdens hoogwater voor de convergentielengte van het stroomvoerend oppervlak een grotere waarde gebruikt (minder convergerend) dan tijdens laagwater. De gehanteerde waarden zijn redelijk in overeenstemming met de waargenomen bodem van 1998 voor dit traject. In dat geval is dus de veranderende vorm van het dwarsprofiel in opwaartse richting verantwoordelijk voor het verschil van de looptijden.

## 6.3 Effecten van Ingrepen volgens het analytische model

De effecten van een aantal ingrepen is met het analytische model onderzocht en vergeleken met de resultaten van numerieke modellen. Volumeveranderingen van het Gat van Ossensisse en Middeldgat ter grootte van 12-25 Mm<sup>3</sup> zoals berekend met Delft3D worden door het analytische model in kwalitatieve zin goed gereproduceerd. Een toename (afname) van het geulvolume leidt tot een toename (afname) van de amplificatie tussen Terneuzen en Hansweert (Figuur 4.3).

De directe en indirecte effecten van zandwinning en overige morfologische veranderingen tussen Vlissingen en Bath, zoals berekend door Finel2D, worden door het analytische model in kwalitatieve zin gereproduceerd. Dit betekent een toename van de M2-amplitude in opwaartse richting ten gevolge van een netto toename van het geulvolume (Figuur 4.11a+b). De M2-amplitude voor het traject Hansweert-Bath blijkt relatief ongevoelig te zijn voor diepteveranderingen. Dit wordt zowel door Finel2D als het analytische model aangegeven. Het analytische model verklaart dit doordat de waterdiepte voor maximale amplificatie bereikt

en zelfs overschreden wordt. De effecten van zandwinning op de M2-amplitude voor het onderzochte zandwinningsscenario zijn dus het kleinst voor het traject Hansweert-Bath.

Effecten van een toename van de waterberging als gevolg van een veronderstelde bodemverlaging van het Land van Saeftinge worden door het analytische model qua grootte gereproduceerd. Finel2D berekent een afname tussen Vlissingen en Hansweert; met het analytische model wordt de afname pas aangegeven tussen Hansweert en Bath, waarbij verondersteld is dat de getijslag in Hansweert niet is beïnvloed door de ingreep (Figuur 4.14). In werkelijkheid zullen de stroomsnelheden afwaarts van Saeftinge zijn toegenomen door de toegenomen komberging. De grotere bodemwrijving leidt dan tot effecten benedenstrooms van Hansweert.

Met het analytische model kunnen dus 1<sup>e</sup>-orde afschattingen worden gegeven van effecten van ingrepen vooral waar het volumeveranderingen van de geulen betreft. Sommige effecten van ingrepen in het estuarium zijn in Vlissingen merkbaar. Door beperkingen in de schematisatie kunnen deze effecten niet door het model worden weergegeven. Het model kan worden gebruikt als 'pilot' voordat gebruik wordt gemaakt van geavanceerde numerieke modellen en voor de analyse van de resultaten van deze modellen.

#### 6.4 Beheeraspecten

Uitgaande van de huidige situatie zal de getijslag kunnen worden gereduceerd door het geulvolume te verminderen. De effecten werken per traject verschillend door vanwege de verschillen in geometrie en bodemligging. Een volumeverandering van de stroomvoerende geul met een bepaalde waarde leidt in het opwaartse deel van het estuarium tot grotere veranderingen in de geuldiepte dan eenzelfde volumeverandering in het afwaartse deel omdat het geuloppervlak in opwaartse richting afneemt. De effecten op veranderingen in de amplificatie en daarmee de getijslag in het opwaartse deel zullen daarmee relatief groot zijn. Mede bepalend voor deze effecten is de vraag in welke mate de situatie met maximale amplificatie is benaderd. Een toename van de waterberging kan ook leiden tot een toename van de amplificatie, maar pas bij waterdiepten die groter zijn dan de huidige. Deze laatste, anti-intuïtieve, constatering kan worden geverifieerd met een numeriek model.

## 7 Referenties

Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013:

- Influence morphology on tide and sand transport. LTV V&T-rapport G-4.
- Data-analysis water levels, bathymetry Western Scheldt. LTV V&T-rapport G-5.
- Data-analysis water levels, bathymetry Lower Sea Scheldt. LTV V&T-rapport G-6.
- Simulaties met effectanalyse op schaal estuarium. LTV V&T-rapport G-11.

Houston, J.R., R.G. Dean, 2011. Accounting for the Nodal Tide to Improve Estimates of Sea Level Acceleration. *Journal of Coastal Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 801-807.

Rijkswaterstaat, 2009. Bodem/getij-signalering Westerschelde 2008. Team Signalering Meetadviesdienst. Concept-groeidocument. Versienummer 2009-1.

Van Rijn, L.C., 2011, Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries; part 1: tidal wave propagation in convergent estuaries. *Ocean Dynamics* 61: 1719-1741. DOI 10.1007/s10236-011-0453-0.

Yndestad, H. 2006. The influence of the lunar nodal cycle on Arctic climate. *ICES Journal of Marine Science*, 63: 401-420. Doi:10.1016/j.icesjms.2005.07.015.